



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

도시계획학 박사학위논문

산림성 조류의 도시내 번식이동
연결망 특성

-랜덤워크 모형의 개발과 적용-

**Network Characteristics of Forest Birds' Dispersal
Movement in an Urban Area**

-Development and Application of the Random Walk Model-

2013년 1월

서울대학교 환경대학원

환경계획학과

이 응 경

산림성 조류의 도시내 번식이동

연결망 특성

-랜덤워크 모형의 개발과 적용-

**Network Characteristics of Forest Birds' Dispersal Movement in
an Urban Area**

-Development and Application of the Random Walk Model-

지도교수 이 도 원

이 논문을 도시계획학 박사학위 논문으로 제출함

2013년 1월

서울대학교 환경대학원

환경계획학과

이 응 경

이응경의 박사학위 논문을 인준함

2013년 1월

위 원 장 최 막 중 (인)

부 위 원 장 강 병 남 (인)

위 원 김 경 민 (인)

위 원 박 찬 열 (인)

위 원 이 도 원 (인)

국문초록

자연 생태계는 우리들에게 식량과 물의 제공, 오염 정화, 기후변화 제어 등 다양한 혜택을 제공하고 있다. 최근 생태학에서는 이러한 혜택을 생태계 서비스(Ecosystem Services)라고 부르며, 전세계적으로 다양한 연구들이 진행되고 있다. 공간계획 측면에서도 한정된 자원을 투입해서 보다 나은 효과를 얻고자 한다면, 기존 공간에 주어지고 있는 생태계 서비스의 종류, 공급량, 그리고 공급망의 구조를 잘 이해하고 활용할 필요가 있다.

도시에서 조류는 다양한 기능적 서비스를 제공하고 있다. 조류가 도시에 공급하는 생태계 서비스의 양은 조류의 활동량과 관련되며, 공급망의 구조는 주변 생태계에서 도시로 이동하는 조류의 경로 선택과 관련되어 있다. 그러나 조류 서식처 질에 대한 연구는 상대적으로 많았지만, 생태계 서비스와 직접적 관련이 있는 조류의 이동이나 활동의 분포에 대한 연구는 부족했다.

복잡한 도시 환경에서 많은 새들의 활동을 정량적으로 해석하고 예측하기 위해서는, 조류의 이동 과정과 그 결과의 분포를 동태적이며 확률적으로 다룰 수 있는 도구가 필요하다. 일견 무작위적으로 보이는 많은 개체들의 이동을 확률적으로 해석하는 랜덤워크(random walk) 이론을 도입함으로써, 이러한 질문들에 대한 실용적이며 학문적인 접근이 가능해질 수 있다.

이 연구에서는, 도시 지역에서 조류의 분포와 이동을 설명할 수 있는 2차원 격자 구조의 랜덤워크 모형을 개발하고, 이 모형을 이용해 주변 산림 생태계에서 도시 내부로 연결되는 조류 이동 연결망의 특성을 분석하는 틀을 제시했다. 그 첫 번째 과정으로 평형상태(steady state)에서

조류의 분포와 이동을 예측할 수 있는 수학적 모형을 개발했다. 또한 수원시를 대상지역으로 구체적인 모형을 구현하고, 모형의 외삽 적용 가능성을 확인하기 위해 동일한 모형을 성남시에 적용했다. 마지막으로 수원시의 도심에 위치한 팔달산에서 발견된 박새들의 유입 경로를 분석하고, 연결성 취약 지역을 분석했다.

수학적 모형은 4가지 정의와 4가지 가정을 이용해, 조류의 랜덤워크를 시공간적으로 불연속적인 마코프 과정(Markov process)으로 해석함으로써 개발됐다. 사용된 4가지 정의를 이용해서, 대상은 산림성 조류(특히 박새류)로 한정하고 이동은 번식이동(dispersal movement)으로 한정했다. 모형의 단순화를 위해 단위 시간당 이동 거리를 한 격자 단위로 고정했으며, 최적 수렵 이론(optimal forage theory) 등의 연구 결과들을 활용해서 선호도 개념을 제안했고, 이동 방향은 선호도에 따라 확률적으로 결정되도록 했다.

개발된 모형은 수원시를 대상지역으로 구현됐다. 토지피복에 따른 선호도를 입력 자료로, 평형상태에서 조류 활동도의 분포를 예측하고, 2009년 번식기 조사 자료(79개 지점)들과 비교했다. 비교 결과, 수원시 환경에서 조류 분포가 완전한 평형상태에 도달했다고 가정할 수는 없으나, 모형 결과는 현장 조사 결과를 비교적 잘 설명할 수 있었다. 또한 다른 지역에 대한 모형의 외삽 적용 가능성을 검토하기 위해 동일한 모형을 성남시에 적용했으며, 성남시의 더 많은 조사 자료(357개 지점)에서도 비슷한 정도의 설명력을 확인할 수 있었다. 따라서 다른 도시에 대한 모형의 외삽 적용 가능성 또한 긍정적일 것으로 판단된다.

모형의 실용적인 활용 사례로써, 수원시 도시 내부에서 번식이동 연결망 특성을 분석했다. 도심에 위치한 팔달산에서 발견된 박새들은 도시 외부에 존재하는 더 큰 산림 생태계에서 유입된 것으로 판단되는데, 어

떤 지역에서 출발했으며, 어떤 경로를 통해 팔달산까지 도달했는지 가장 그럴듯한(plausible) 경로를 확률적으로 추정했다. 가장 그럴듯한 경로 추정을 위해서 각 공간의 번식이동 기여도와 매개중심성(betweenness centrality) 지수를 개발하고 활용했다. 그 결과 수원시 북쪽의 광교산에서 출발해서, 팔달산의 북동쪽으로 이어지는 파편화된 녹지들을 이용했을 가능성이 가장 큰 것으로 예측되었다. 이 경로상에서, 연결성 취약지역 또한 제시됐다. 이런 접근방법은, 조류에 의한 생태계 서비스 공급망의 복원 측면에서 가장 효과적인 투자가 가능한 후보 지역들의 선정 과정에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

이 연구의 주요 발견 사항들은 다음과 같다.

1. 모형은 비교적 단순한 구조를 가지지만, 두 도시 지역에서 성공적으로 박새류의 활동 분포를 예측했다. 산림성 조류의 번식이동에 대해서 충분히 외삽 적용 가능성이 있다고 판단된다.
2. 평형상태 예측 결과, 조류 활동의 공간적 분포는 정규분포 또는 그와 유사한 분포를 보이지 않았다. 이 특성은 도시 지역에서 조류상 조사 설계나, 조류 이동 경로의 연결성을 고려한 개발지역 선정 과정에서 고려될 필요가 있다고 판단된다.
3. 수원시 팔달산에서 발견된 박새류는 수원시 북쪽의 광교산에서 출발해서, 팔달산 북동쪽의 파편화된 녹지들을 따라 번식이동해왔을 가능성이 크다.
4. 수원시의 경우 하천이나 가로수 등의 선형 녹지보다는 도시 내부의 작은 산림이나 큰 공원의 번식이동 기여도가 더 컸다. 도시 내부의 산림들은 주변의 새들을 모아 팔달산까지 보내는 펌프와 같은 역할을 하고 있다고 판단된다.

5. 공간의 매개중심성과 변식이동 기여도를 중첩했을 때 연결성 취약지역을 보다 쉽게 찾아낼 수 있었다. 이 접근 방법은, 조류의 변식이동 연결망 복원 또는 보완을 위해 효과적인 투자가 가능한 생태적 후보 지역을 선정하는 과정에 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구에서는 조류의 이동을 변식이동만으로 제한하고, 선호도 가정을 도입했으며, 이동 속도를 상수로 가정했다. 이 제한을 통해 모형의 구조를 단순하게 유지했고, 외삽 가능성을 높일 수 있었다. 그러나 보다 현실적인 예측이나, 레비 비행과 같은 흥미로운 현상을 설명할 수 있기 위해서는 이 제한 사항들을 개선할 필요가 있다. 추가해서, 조류의 활동에 대한 원격 측정이 충분히 이뤄진다면, 조류가 도시에 공급하고 있는 생태계 서비스 공급망의 구조적 특성과 교란에 대한 안정성 등 보다 다양하고 흥미로운 질문들에 대한 답을 얻을 수 있을 것이다.

주요어 : 생태계 서비스, 조류의 변식이동, 랜덤워크, 마코프 과정,
연결망, 매개중심성

학 번 : 2003-31153

<목차>

I. 서론	1
1. 연구의 배경	1
1) 생태계 서비스(Ecosystem Service)	1
2) 조류의 생태계 서비스	2
3) 조류의 확률적 이동(Random walk)	4
2. 연구의 목적과 과정	8
II. 평형상태 모형의 개발과 적용	9
1. 조류의 확률적 이동 모형	9
1) 조류	9
2) 조류의 분포	10
3) 조류의 이동	13
4) 마코프 과정 표현과 평형상태	18
5) 평형상태의 계산	20
2. 선호도 가정	21
3. 대상지와 자료 수집	26
1) 대상지 개요	26
2) 토지피복	28
3) 조류 현장 조사	30
4. 수원시 평형 상태 모형 구현	32
1) 모형의 구현	32
2) 선호도	33
3) 평형상태 예측결과	39

III. 성남시 평형모형 적용	47
1. 대상지와 자료 수집	47
1) 대상지 개요	47
2) 토지피복	47
3) 조류 현장 조사	50
2. 모형의 적용	51
1) 모형의 적용	51
2) 평형상태 예측결과와 현장조사 결과의 비교	51
3) 전문가 설문에 의한 선호도와 비교	55
 IV. 도시내 이동 연결망 특성	 57
1. 조류에 의한 생태계 서비스의 도시내 공급망	57
2. 모형의 구현	60
1) 대상지역 설정	62
2) 조류의 이동	62
3) 유한 크기 효과(Finite size effect)	63
4) 격자별 이동 기여도와 순 이동량	64
5) 매개중심성(Betweenness centrality)	67
3. 모형 결과	69
1) 유한 크기 효과	69
2) 공간 기여도와 순 이동량	70
3) 매개중심성(Betweenness centrality)	74
4) 연결성 취약 지역	76

V. 토론과 결론	79
1. 평형상태 모형 개발	79
2. 선호도 문제	80
3. 자료 관측의 문제	81
4. 모형의 한계와 개선 방향	83
5. 번식이동 경로 평가와 생태계 서비스	85
 참고문헌	 87

<표 차례>

표 1 조류의 공간적 이동(Pettingill, 1985).	14
표 2 수원시 출현종 중 이 연구의 대상종들인 박새류 출현 개체수.	32
표 3 수원시 토지피복에 따른 선호도.	38
표 4 몇 가지 정규성 검사 결과.	42
표 5 성남시 출현종 중 이 연구의 대상종들인 박새류 출현 개체수.	51
표 6 모형 예측 경향에서 가장 많이 벗어난 상위 10%의 지점들.	83

<그림 차례>

그림 1 먹이를 물고있는 박새.	3
그림 2 조류의 랜덤워크 개념.	7
그림 3 연구 흐름도.	8
그림 4 단순화한 조류의 활동량.	11
그림 5 수원시 대상지 개요.	27
그림 6 수원시와 인접지역의 토지피복.	29
그림 7 수원시 조류조사 유효 지점(79개 지점).	31
그림 8 조류의 이동 방법.	33
그림 9 수원시 평형상태 예측 결과와 현장조사 결과 비교.	40
그림 10 평형상태 예측결과 확률분포.	41
그림 11 수원시 모형 예측과 현장조사 결과 비교.	44
그림 12 전문가 설문 선호도에 의한 수원시 모형 예측과 현장조사 결과 비교.	46
그림 13 성남시 대상지 개요.	48
그림 14 성남시와 인접지역 토지피복과 유효 조사 지점(357개).	49
그림 15 성남시 평형상태 예측 결과와 현장조사 결과 비교.	52
그림 16 성남시 모형 예측과 현장조사 결과 비교.	54
그림 17 전문가 설문 선호도에 의한 성남시 모형 예측과 현장조사 결과 비교.	56
그림 18 개념적으로 구분한 네 가지 조류의 활동 경로들.	59
그림 19 경로 분석 시뮬레이션을 위한 대상지 설정.	61
그림 20 시간별 목표지점 도달률.	70
그림 21 성공한 번식이동에서 공간 기여도와 순 이동량 벡터.	71
그림 22 공간 기여도와 순 이동량 벡터 부분 확대.	73
그림 23 최적 경로에 의한 매개중심성(betweenness centrality).	75
그림 24 매개중심성(betweenness centrality)과 공간별 경로 기여도의 중첩.	78

I. 서론

1. 연구의 배경

1) 생태계 서비스(Ecosystem Service)

자연 생태계는 우리들에게 식량과 물을 공급하고, 여가와 휴양의 기회를 제공하며, 오염물질을 정화하고, 기후변화를 제어하는 등 다양한 혜택을 제공하고 있다(Millennium Ecosystem Assessment, 2003). 이 혜택들의 생산과 배분 측면에서 특징은, 그것들이 경제학적 원리에 따라 시장을 통해 생산되거나 공급되는 것이 아니고, 생태적 과정에 의해 무차별적이며 공짜로 공급되고 있다는 점이다. 이러한 특징으로 인해, 인간의 생존과 복지에 필수적인 이 혜택들의 중요성에 대한 인식은 널리 공유되고 있는 반면, 그 가치가 의사결정 과정에서 실질적으로 반영되기는 어려웠다(Costanza et al., 1997; Faber et al., 2002).

최근 생태학에서는 이러한 혜택을 생태계 서비스(Ecosystem Service)로 부르며 다양한 이론적, 실증적 연구들을 진행하고 있다(Millennium Ecosystem Assessment, 2003; Tallis et al., 2009). 그 중에서도 1997년 Nature에 게재된 Costanza 등의 논문은 가장 주목할 만한 성과 중 하나일 것이다. 이 연구에서 Costanza 등은 생태계의 혜택을 17개 독립적인 범주로 구분하고, 그 가치를 정량적으로 평가했다. 그 결과 화폐 단위로 표시된 지구 전체 생태계 서비스의 가치는 연간 최소 16조 달러에서 최대 54조 달러(1994년 US\$ 기준)로 보고됐다. 이는 당시 지구의 국민총생산(World GNP)이 연간 18조 달러인 점을 고려할 때, 전체 경제 체계 내에서 생태계 서비스의 중요성을 충분하고도 남을 만큼 강조할 수 있는 수치였다(Costanza et al., 1997; Balmford et al., 2002).

비록 그 이후 다양한 논란이 있었지만(Balmford et al., 2002), 막대한 양의 생태계 서비스가 지속적으로, 그것도 공짜로 우리에게 제공되고 있다는 사실 만큼은 논란과 상관없이 중요한 의미를 가질 수 있을 것이다. 예를 들어 공간계획의 목표가 주어진 자원의 한계 내에서 더 나은 공간 구조를 구축하고 유지하는 것이라면, 이는 최적화의 문제로 귀결된다. 그렇다면, 기존 공간에 이미 무료로 제공되고 있던 생태계 서비스를 잘 이해하고 활용하는 것은, 추가적인 투자가 최대 효과를 달성할 수 있도록 하기 위한 중요한 선결과제가 된다. 생태계 서비스를 공간계획에 활용할 때, 생태계 서비스의 전체적인 양과 질뿐만 아니라 그 공급망의 공간적 구조도 중요한 변수가 될 것이다.

2) 조류의 생태계 서비스

조류는 이동성이 가장 큰 척추동물군으로, 생태계에서 비교적 상위 포식자의 지위를 차지하고 있으며, 우리들에게 다양한 서비스를 제공하고 있다(Pettingill, 1985; Whelan et al., 2008; Wenny et al., 2011). 생태계 서비스는 일반적으로 4가지 큰 범주로 나누는데, 직접적인 생산물과 관련된 공급 서비스(provisioning services), 생태계 과정의 조절로 편익을 얻는 조절 서비스(regulating services), 여가와 휴양 그리고 정서적 체험을 제공하는 문화 서비스(cultural services), 그리고 간접적이며 장기적인 편익을 제공하는 부양 서비스(supporting services)가 그것이다(Millennium Ecosystem Assessment, 2003). 조류에 의해 제공되는 서비스는 주로 조절과 부양 서비스와 관련된다(Wenny et al., 2011).

조류가 제공하고 있는 생태계 서비스는 다시 한 번 직접적인 서비스와 간접적인 서비스로 구분할 수 있다(Wenny et al., 2011). 먼저 직접적인 서비스로는 상위 포식자로서 곤충이나 작은 무척추동물, 또는 작은

설치류 등을 잡아먹음으로써 제공되는 병충해 조절 서비스가 있다. 다음으로는 외래종 식물에 대해서 천적으로 작용하거나, 식물의 수분(受粉)을 매개하거나, 또는 먼 지역까지 종자를 전파하는 식물 상호작용 서비스가 있다. 또한 동물의 사체를 먹고 분해하는 서비스가 있으며, 보다 낮은 곳(들, 하천, 바다 등)에서 먹이 등을 취해서 더 높은 곳(산림, 육상 등)에 영양 물질을 공급하는 물질 순환 서비스가 있다. 이 때, 단순히 물질을 이동할 뿐 아니라, 둥지를 만들거나 구멍을 파는 등 생태계 미세 구조의 다양성을 높이는 생태 공학(ecosystem engineering) 서비스도 함께 제공하게 된다(국립산림과학원, 2005; Whelan et al., 2008; Koh, 2011; Wenny et al., 2011).



그림 1 먹이를 물고있는 박새(양현숙, <http://sallynice.blog.me/110085827159>)
와 소쩍새(최종수, <http://photo.naver.com/view/2009071617483457615>).

조류가 제공하는 생태계 서비스의 큰 특징 중 하나는, 대부분의 직접적인 생태계 서비스들이 간접적인 서비스 또한 유발한다는 점이다. 예를 들어 해충을 사냥하고 식물과 상호작용을 통해서 식생의 생태적 안정성과 다양성을 증가시키게 되면, 식생에 의한 음식, 목재, 약재, 토양침식 억제와 홍수방지, 산소 생산과 기후변화 제어 등의 부가적 서비스들이

발생하게 된다(Wenny et al., 2011). 이는 상위 포식자의 지위를 가지는 동물군이 생태계 전반에 광범위하면서도 포괄적인 영향을 끼칠 수 있다는 연구 결과와도 부합된다(Ripple and Beschta, 2011).

다만 이러한 점 때문에 조류에 의한 생태계 서비스의 가치를 직접 산정하기는 어려워질 수도 있다. 간접적인 효과를 모두 포괄해서 합리적으로 평가할 수 있는 모형을 만들기는 어려운 반면, 직접적인 효과를 가지는 특정 종을 대상으로 모형을 만들기는 상대적으로 쉽다. 그런 접근은 흔히 지표종 모형(indicator-species model)으로 구현되는데(Wenny et al., 2011), 제한적인 정보에 비해 효과적인 결과를 얻을 수 있다는 장점 등이 있어 많이 사용되고 있다. 그러나 최근의 몇 가지 연구들에 따르면, 지표종 모형 접근방법이 특히 풍부도나 다양도의 예측에 있어서 일관되게 신뢰할 수 있는 결과를 내지 못했다는 사례들도 보고되고 있다(Roberge et al., 2008; Larsen et al., 2009; Cushman et al., 2010).

3) 조류의 확률적 이동(Random walk)

조류가 도시에 공급하는 생태계 서비스는 대체로 먹이 활동과 가장 연관이 많다(Whelen et al., 2008; Wenny et al., 2011). 이 때, 조류에 의해 공급되는 서비스의 양은 조류의 활동량과 관련되며, 공급망의 구조는 배후 생태계에서 도시 내부로 이동하는 조류의 경로 선택과 관련되어 있다. 즉 조류의 정적인 분포보다는 동적인 활동량과 직접적으로 관련되어 있다. 그러나 조류의 서식처 질에 대한 연구는 상대적으로 많지만, 조류의 이동과 활동 분포에 대한 연구는 부족하다.

조류에 의한 생태계 서비스는 간접적인 서비스가 많고, 기존 연구들이 대부분 정적인 분포를 예측하는 데 집중하고 있으므로, 생태계 서비스 맥락에서 조류에 대한 연구는 극히 드물었다. 조류에 의한 생태계 서

비스는 주로 조절 서비스나 부양 서비스인데 반해서, 그 동안의 연구는 주로 정서적 측면에서 조류 관찰이 주는 효과나, 사냥을 통해서 직접적으로 얻는 수확물에 대한 연구들이 이루어졌다(Wenny et al., 2011). 생태계 서비스 측면에서 조류의 기여를 정량적으로 평가하기 위해서는, 시간과 공간 차원을 가지는 조류 활동 자료가 필요하며, 이를 적절하게 해석하고 시공간적으로 예측할 수 있는 모형이 필요할 것이다. 이 모형은 정적인 분포보다는, 동적인 활동량을 다룰 수 있는 동태(dynamic) 모형이어야 할 것이다.

특정 공간에서 개체들의 이동 기작을 확률적으로 다루는 접근 방법 중 대표적인 것으로는 랜덤워크(random walk)이론이 있다. 꽃가루 같은 작은 입자들의 무질서해 보이는 운동을 확률적으로 다루며 시작된 이 이론은, 브라운 운동을 이용해서 아보가드로 수를 측정할 수 있는 방법을 밝힌 아인슈타인의 논문이 발표되면서 잘 알려지고 연구되기 시작했다(Klafter et al., 1996). 비교적 역사가 짧은 분야이지만, 흥미로운 성과들이 많이 생산되며 다양한 분야에서 활용되고 있는 이론이다(Klafter et al., 1996; Codling et al., 2008). 최근에는 알바트로스, 상어, 거북 등 다양한 동물들의 이동 양상뿐 아니라, 원시 부족의 이동 양상 등 사람의 이동까지도 랜덤워크를 이용해서 분석하는 다양한 시도들이 이루어지고 있다(Viswanathan et al., 1996; Brown et al., 2007; Buchanan, 2008; Rhee et al., 2011). 이 이론의 장점은 특정한 개체의 특정 시점에서 이동이나 위치를 설명하기는 어렵지만, 많은 개체들이 활동할 경우 그 위치나 분포와 이동을 확률적으로 예측할 수 있다는 것이다.

그러나 랜덤워크를 이용해서 동물의 행동을 설명하거나 예측하는 연구들은 대부분 비어있는 균질적인 공간 또는 매우 단순화된 가상의 공간에서 이루어지고 있다. 특정한 현실 공간에서 개체와 주변 환경 사이에

이루어지는 상호작용을 포함시킬 경우, 설명 방정식을 풀어 그 매개변수를 의미 있게 예측하거나 해석하기가 극히 어렵기 때문이다. 그러나 조류는 이동하는 과정에서 서식지 특성뿐만 아니라 경관의 구성에도 영향을 받는다(Hostetler, 2001). 경관 수준에서 조류군집 구성에는 많은 주변 환경의 영향이 관여되며, 특히 단편화된 서식지에서는 더 많은 영향을 받는다는 연구도 있다(Andren, 1992; Marzluff and Restani, 1999).

지속적으로 토지이용이 변해가는 도시 지역에서 조류의 이동 과정은, 주변 환경의 영향을 포함시킨 비평형 상태 랜덤워크로 해석될 수 있다. 이 경우 현재와 미래의 상태를 보다 정확하게 설명하기 위해서는, 적절한 모형뿐 아니라 현재 환경이 구성된 시점의 조류 분포에 대한 초기값 정보, 토지피복에 따른 영향, 초기 분포 형성 시점부터 지금까지의 지속 시간 등의 정보가 필요하다. 그러나 현실적으로는, 다양한 토지피복에 따른 영향은 현재 시점에서도 실증적 연구가 가능할 것이지만, 초기값 분포와 지속 시간에 대한 정보는 사실상 얻기 불가능할 것이다. 그러므로 도시 환경에서 조류의 분포와 이동을 정확하게 설명하고 예측하기 위해서는 다양한 초기 분포와 지속 시간을 확률적으로 고려할 수 있는 비평형 랜덤워크 모형이 필요하다.

이런 모형의 또 다른 장점은 기존의 조사 자료들을 최대한 활용할 수 있다는 점이다. 특정 개체들의 이동 양상을 연구하기 위해서 일반적으로 직접적인 이동 추적 조사 방법이 거론된다. 그러나 이런 조사 방법은 비용과 시간이 많이 소요되며, 전자기파를 이용한 원격 측정 방법을 이용할 경우에는 추적기를 부착해야 하므로 필연적으로 대상 개체에 영향을 주게 된다(채희영 등, 2000). 무엇보다 직접적인 이동 추적 조사 자료는 일반적인 개체수 조사 자료에 비해 수가 적다. 그러나 모형을 함께 이용함으로써, 보다 풍부한 개체수 조사 자료를 활용해서 조류의 이동

양상을 예측할 수 있게 되므로, 보다 넓은 지역에서 조류의 이동 양상을 전반적으로 예측하는 것이 가능해진다.

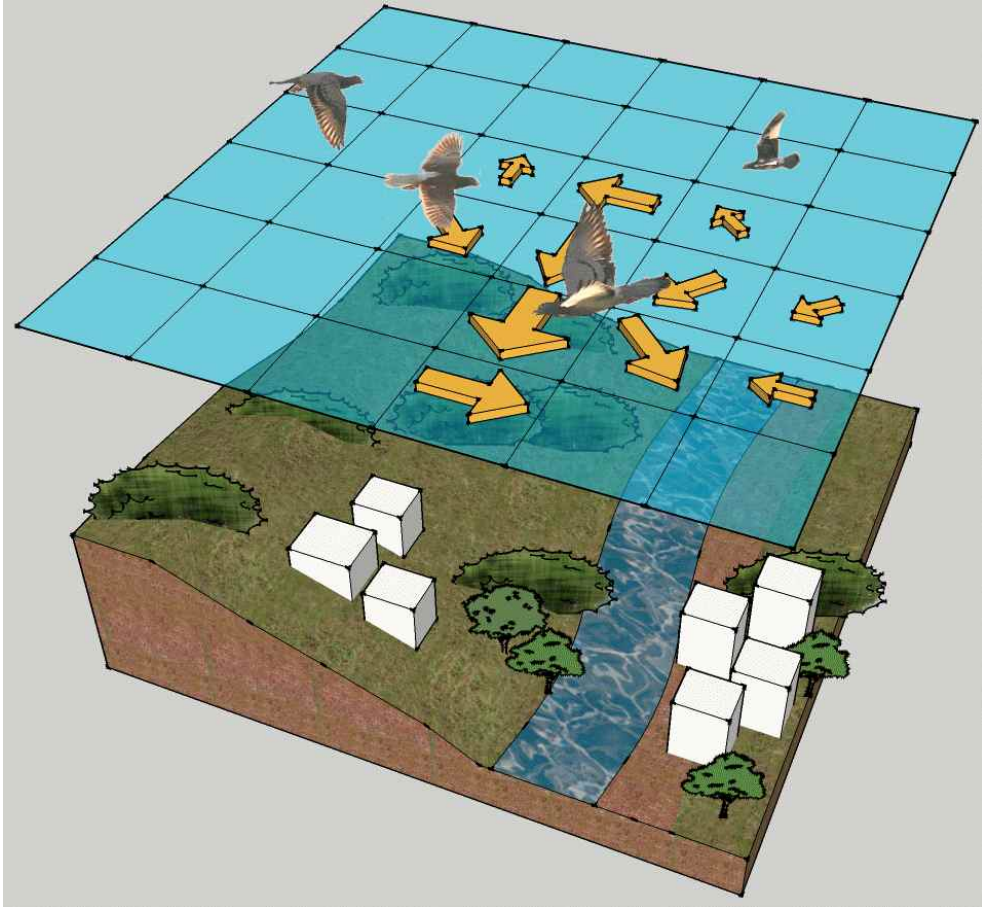


그림 2 조류의 랜덤워크 개념(김경아 그림). 조류는 주변 환경과 상호작용하면서 어떤 곳은 더 자주 방문하고, 어떤 곳은 덜 가거나 회피한다.

2. 연구의 목적과 과정

이 연구의 목적은 도시 지역에서 조류의 분포와 이동 양상을 설명할 수 있는 2차원 격자 구조의 랜덤워크 모형을 개발하고, 이 모형을 이용해 주변 산림 생태계에서 도시 내부로 연결되는 조류 이동 특성을 분석하는 틀을 제시하는 것이다. 이 목적을 위한 단계별 과정과 목표는 다음과 같다.

첫째, 문제를 형식화하고 평형상태(steady state) 조류의 분포와 이동을 예측할 수 있는 모형을 개발한다. 둘째, 수원시를 대상으로 실제로 모형을 구현한다. 셋째, 구현된 모형을 다시 성남시에 적용시켜 모형의 범용적 활용 가능성을 탐색한다. 넷째, 평형모형을 개선해서 비평형 모형을 개발하고, 이를 활용해 주변 산림 생태계에서 도시 내부로 이동하는 조류의 이동망 특성을 분석한다.

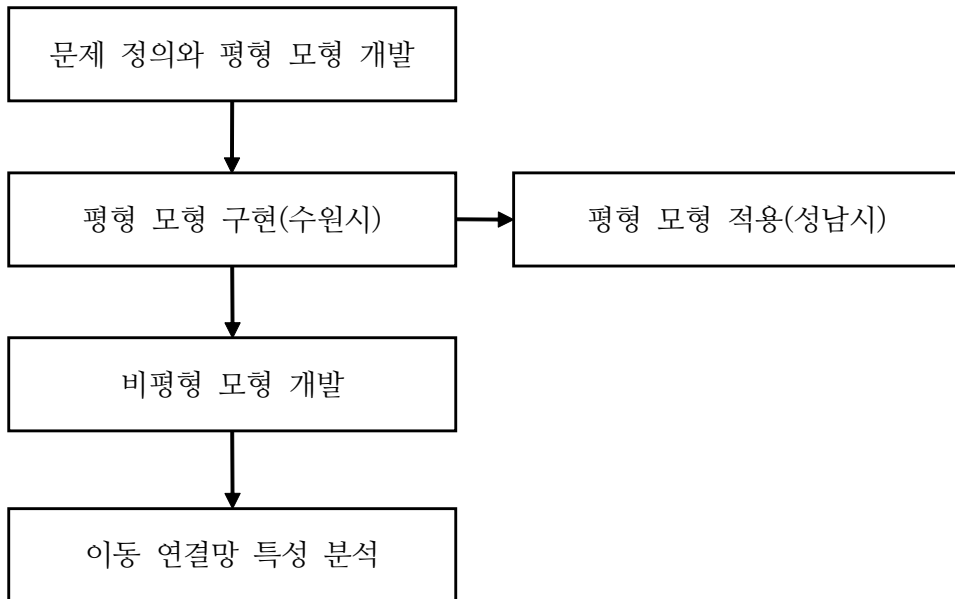


그림 3 연구 흐름도.

II. 평형상태 모형의 개발과 적용

1. 조류의 확률적 이동 모형

조류의 이동 기작을 설명하기 위해서는, 이론적으로 매우 많은 변수들이 관여될 것이다. 그러나 복잡한 실제 환경과의 상호작용을 포함하는 랜덤워크 모형 연구의 초기단계이므로, 모형은 가급적 단순한 구조를 가지도록 구현했다. 단순한 모형은 복잡한 모형에 비해 세밀함과 현실성은 다소 부족할 수 있으나, 범용성이 크고 해석이 명확해질 수 있다는 장점이 있다. 특정한 대상지나 종에 대한 보다 현실적이고 세밀한 부분들은 향후 연구로 남겨둔다.

1) 조류

조류란 조강(鳥綱)에 속하는 척추동물의 총칭으로 날개를 가지며 항온동물이다(위키디피아, <http://ko.wikipedia.org/wiki/새>). 그러나 이런 사전적 정의 없이도 거의 모든 사람들은 새를 쉽게 알아볼 수 있다. 새들은 개체수도 많고 다른 대형 동물군에 비해 쉽게 관찰되므로, 이미 대다수의 사람들에게 익숙하기 때문이다. 그러나 조류의 이동과 분포를 정량적으로 기술하고 예측하기 위해서 보다 조작적인 정의가 필요하다. 이 과정은 Jørgensen(1992)의 모형연구 절차 중 문제와 대상계의 정의 단계에 해당된다.

정의 1. 이 연구에서 조류는 개별 개체(individual)가 아니며, 대상지 내에 존재하는 모든 조류들 중 박새류(Titmice)만을 의미한다.

박새류는 박새(*Parus major*), 쇠박새(*Parus palustris*) 등의 참새목 박새과 박새속에 속하는 대표적인 산림성 조류들이다. 우리나라에서는 주로 나무 구멍에 둥지를 틀고, 4월경 산란을 시작하며, 비번식기에는 무리를 지어 생활한다(한반도 생물자원 포털). 이 연구에서 박새류를 선택한 이유는 다음과 같다. 첫째, 공간적으로 넓게 분포하며, 비교적 개체수가 많다. 이들은 우리나라와 유라시아 전역에 텃새로 서식하며, 주로 활엽수림 등의 산림에 서식하지만 사람들이 사는 곳에서도 발견되는 등 비교적 다양한 곳에 서식하는 것으로 알려져 있다(한반도 생물자원 포털). 둘째 박새류는 텃새이므로 계절적 이주를 고려할 필요가 없다. 셋째, 주요 둥지 장소가 나무 구멍 등이고, 번식기에는 주로 곤충을 잡아먹는 등(한반도 생물자원 포털), 산림성 조류에 의해 공급되는 생태계 서비스를 대표할 수 있는 종들이다. 넷째 비교적 흔히 발견되는 종들이며 관련 연구도 상대적으로 많이 축적되어 있는 종들이다.

2) 조류의 분포

이 연구에서 조류의 분포라 함은 다음 정의에 따른다.

정의 2. 조류의 분포라 함은 번식기 조류 활동의 공간적 양상을 의미한다. 여기서 조류 활동은 개별 개체들의 활동의 합을 의미한다.

특정 위치에 x_A 와 x_B 에 둥지를 가진 조류 A 와 B 를 생각해보자(그림 4). 이들은 둥지 위치를 중심으로 어느 정도의 행동권을 형성하고 다양한 활동을 할 것이다. 이들의 활동량은 둥지 주변에서 최대화 될 것이고, 둥지에서 멀어질수록 줄어들다가, 행동권 범위를 벗어나면 그 위치에서 해당 조류의 활동량은 거의 0이 될 것이다.

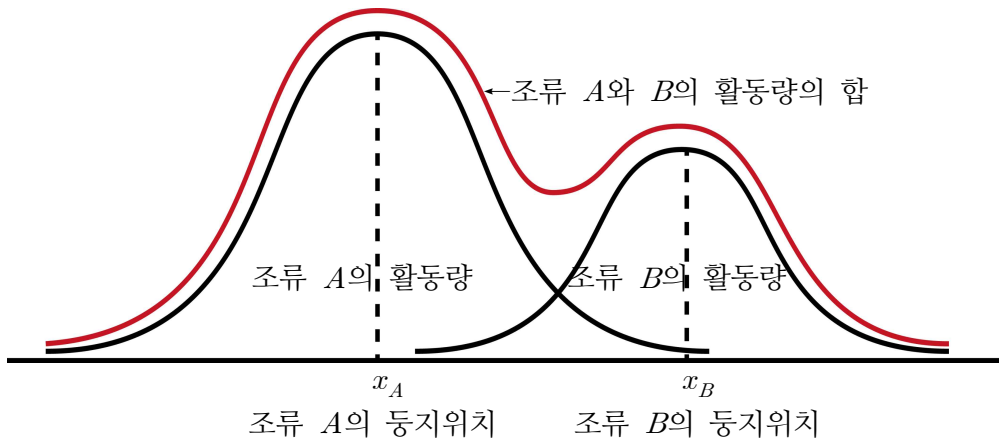


그림 4 단순화한 조류의 활동량.

이때 조류 A와 B의 행동권이 어느 정도 겹친다면, 공유된 지역에서
의 활동량은 조류 A와 B의 활동량의 합이 될 것이다. 이 때, 설명의 간
결함을 위해서 조류간의 상호작용, 위치에 따른 자원의 이질성, 그리고
기타 조류 활동에 미치는 외부적 영향들이 없다고 가정한다면, 조류 A
와 B의 활동량 분포와 그 둘의 활동량 합의 분포는 그림 4와 같이 표현
될 수 있다. 활동량의 물리적인 정의는 다음과 같다.

*정의 3. 특정 공간에서의 조류 활동량이란, 단위 면적과 단위 시간에
대해서 해당 지역에 출현한 회수를 의미한다.*

위 설명에서 조류 A가 특정 지역 x_C 에 한 번 방문했을 경우 x_C 에
서 조류 활동량은 1 단위 증가한다. 여기에 조류 B가 방문했을 경우 다
시 활동량은 1 단위 더 증가한다. 여기서 주의할 점은 활동량의 측정이
특정 시간 단위에 따라 이루어진다는 점이다. 즉 1시간 단위로 조류의
활동량을 측정한다면, 특정 시점에 x_C 에 방문한 조류 A가 1시간을 채우

지 않고 일찍 떠나도 활동량은 1 단위 증가하며, 그 A 가 x_c 에 다음 시간까지 머무르는 경우에는 활동량이 1 단위 증가한다. 식 1은 정의 3의 수학적 표현이다.

$$A_x(t) = \sum_{i=1}^N a_i(x, t) \quad (1)$$

여기서 $A_x(t)$ 는 공간 x 에서 t 시점에 조류의 활동량을 의미하며, $a_i(x, t)$ 는 공간 x 에서 t 시점에 조류 개체 i 의 출현 또는 활동(activity)을 의미한다. N 은 해당 공간에 해당 시간 동안 활동이 있던 조류 개체들의 총수를 의미한다. 다시, 정의 1과 2, 그리고 3에 의해, 각 공간의 조류 활동량을 전체 개체군의 활동량으로 나눈 값을 모든 공간에 부여한 결과가 조류의 분포가 된다.

$$r_j(t) = \frac{A_j(t)}{\sum_{j=1}^M A_j(t)} \quad (2)$$

여기서 $r_j(t)$ 는 t 시간에 공간 j 에서 조류의 활동도이며, j 는 전체 공간에서 해당 공간의 번호이며, 이러한 작은 공간들의 총 수는 M 이다. 각 공간에서의 활동도를 하나의 성분으로 간주하면, 전체 공간의 분포는 벡터로 표현할 수 있게 된다. 식 3에서 $\vec{s}(t)$ 를 t 시간의 상태벡터 또는 분포벡터로 부른다. 이 식에서 괄호 안의 t 는 시간을 의미하며, 위첨자 t 는 벡터의 전치(transpose)를 의미한다.

$$\vec{s}(t)^t \equiv (r_1(t), r_2(t), \dots, r_i(t), \dots, r_M(t)) \quad (3)$$

이렇게 정의하면 개체군의 크기가 다소 변하더라도 조류의 분포는 독립적으로 표현할 수 있다는 장점을 가진다. 특정 시간에서 상태 벡터는 전체 활동량에 대한 비율을 성분으로 가지므로, 특정 공간에서의 변화 때문에 개체군 크기가 변하더라도, 수학적으로는 해당 공간에서의 이동이 발생한 것과 동일하게 처리할 수 있게 된다.

3) 조류의 이동

Pettingill(1985)에 따르면 조류의 이동은 표 1과 같이 구분할 수 있다. 정의 1에 따라서 이 연구에서 조류의 이동은 개체군의 번식이동(dispersal movements)을 의미한다. 세부적으로는 출생시 번식이동(natal dispersal)과 성체의 번식이동(breeding dispersal)을 모두 포함한다. 이 연구에서 정의하고 사용하는 조류의 이동은 다음과 같다.

정의 4. 조류의 이동은 정의 2와 3에 의해 특정 공간에 주어진 조류 분포값의 시간에 따른 공간적 변화를 의미하며, 그 기작은 조류의 번식 이동에 의해 발생한다.

표 1 조류의 공간적 이동(Pettingill, 1985).

대분류	소분류	설명
maintenance movements	appetitive responses	사는 장소에서 물이나 먹이를 찾기 위함
	escape responses	포식자를 피하거나 피난처를 찾기 위함
	roosting flight	먹이를 먹는 장소와 잠자는 장소 사이를 이동
dispersal movements	natal dispersal	어린 새가 태어난 장소를 벗어나 유리한 장소를 찾아 정착
	breeding dispersal	성조가 연속적인 번식지 사이를 이동
migratory movements	seasonal migration	계절에 따른 먹이 활용도에 대응하여 이동
	zoogeographical migration	대규모 환경적, 기후적, 생태적 변화에 대응한 이동
irruptive or invasion movements		나무 열매 생산량의 변동에 따라 2~3년 간격으로 불규칙하게 조류가 이동

번식이동은 개체의 출생이나 이소 후 짝짓기나 번식 성공률과 같은 변수들과 관련되어 있다. 이런 일련의 과정을 거친 후, 특정 번식기에 동지의 위치가 정해진다면, 동지 주변에서 각 개체들의 활동량은 그림 4와 같이 가정할 수 있다. 따라서 정의 2의 조류 분포를 형성하게 되며, 다음 해 번식기에는 다시 일련의 과정을 거쳐 새로운 조류 분포를 형성하게 된다. 이렇게 번식이동 과정을 거쳐 조류의 분포가 시간에 따라 공간적으로 변하는 과정을 조류의 이동으로 정의한다. 이렇게 정의함으로써, 조류의 이동 결과는 특정 시점에서 활동량을 측정함으로써 파악할 수 있게 된다.

조류의 이동량을 정량적으로 다루기 위해서는 조류의 분포 개념을 활용해서 조류의 이동을 정의할 필요가 있다. 특정 시간 t 에 j 공간에 주어진 활동도 $r_j(t)$ 이 있다고 가정하자. 여기서 시간이 $t+1$ 로 증가할 때, 일정량의 활동도가 그 옆의 공간 k 와 l 로 이동했으며, k 와 l 로부터 j 로의 유입은 없다고 가정하면, 이 때 이동량 $m_{jk}(t)$ 와 $m_{jl}(t)$ 은 식 4와 같이 표현된다.

$$|r_j(t+1)-r_j(t)| = m_{jk}(t) + m_{jl}(t) \quad (4)$$

이 때, $m_{jk}(t)$ 공간 j 에서 공간 k 로 시간 t 에서 1시간 단위 동안 이동한 양이며, $m_{jl}(t)$ 공간 j 에서 공간 l 로 시간 t 에서 1시간 단위 동안 이동한 양이다. $r_j(t+1)$ 는 시간 $t+1$ 에 공간 j 의 활동도이며, 동시에 시간 t 에서 1시간 단위동안 다른 곳으로 이동하지 않고 그 자리에 머물기로 한 활동도라고 할 수도 있다. 따라서 이 때 활동도는 이동량으로 쓸 수도 있게 된다.

$$r_j(t+1) = m_{jj}(t) \quad (5)$$

조류의 이동을 정량적으로 결정하기 위해서는 이동을 결정하는 요소를 조작적으로 정의할 필요가 있다. 이제부터 제시하는 몇 가지 가정들은 이 결정 요소들을 조작적으로 결정하기 위한 것들이다.

가정 1. 정의 1에 의한 조류는 생존과 번식에 필요한 자원의 양에 따라서 특정 공간에 대한 선호도를 가지며, 적절한 시공간 범위 내에서

이 값은 상수이다.

조류를 포함한 모든 동물은 자신의 생존과 새끼 부양을 위해서 다양한 자원을 필요로 한다. 특히 번식기의 박새류는 적당한 둥지 장소, 둥지 재료, 그리고 적당한 먹이와 물 등이 필수적으로 필요하다. 가정 1은 이런 자원의 공간적 분포가 이질적(heterogeneous)이며, 자원의 양에 따라 특정 공간은 좋아하고, 특정 공간은 좋아하지 않거나 심지어 회피하려는 경향이 있으며, 이 경향이 적절한 범위 내에서는 불변하는 것으로 다룰 수 있음을 의미한다.

가정 2. 특정 공간에서 가정 1에 의한 자원의 양은 토지피복 유형에 따라 결정되며, 따라서 특정 토지피복 유형은 특정 선호도를 갖는다.

가정 2는 모형에 요구되는 입력 자료를 단순하게 함으로써, 모형을 쉽게 적용할 수 있도록 하기 위한 조치이다. 예를 들어 쇠박새(*Parus palustris*)의 주요 먹이인 다양한 종의 곤충류와, 둥지 자원 각각의 공간적 분포를 파악하기는 쉽지 않다. 이에 비하여 토지피복 자료는 간단한 조사를 통해서도 비교적 쉽게 구축할 수 있으며, 다양한 자료원을 통해서 구하기도 쉬운 자료이다. 또한 인공위성이나 항공기 등을 이용한 원격탐사를 이용할 경우 넓은 지역에 대한 시계열적 자료도 구축할 수 있다.

토지피복이나 토지이용이 조류의 분포에 영향을 준다는 연구 결과는 매우 많다(Blair, 1996; Hadidian et al., 1997; Blair, 1999; Mörtberg, 2001; 수원시, 2010). 일반적으로 토지피복(landcover)은 지표면을 덮고 있는 물리적 상태를 의미하며, 그 요소로는 식생이나 인공물 뿐 아니라

나출된 토양이나 암석 그리고 수면을 모두 포함한다(Gregorio et al., 2005). 토지피복의 정의나 포함되는 요소들을 고려할 때, 토지피복에 따라 이용 가능한 자원의 양이나 질도 달라지며, 사람에 의한 영향도 달라진다고 가정하는 것은 타당할 것이다.

가정 3. 정의 4에 의한 이동이 발생할 경우, 그 이동 방향은 확률적으로 정해지며, 이 때 확률은 현재 점유된 공간과 주변 공간과의 선호도 비에 의해서 결정된다.

가정 3은 예를 들어 현재 점유된 공간의 선호도가 1이며, 현재 공간과 주변 공간의 선호도 합이 10일 경우, 0.1의 확률로 현재 공간에 남게 된다는 의미이다. 가정 3은 방향만을 결정하며, 한 시간 단위가 변할 때 이동하는 거리는 가정 4로 주어진다.

가정 4. 정의 4에 의한 이동이 발생할 경우, 그 이동 거리는 시간 단위에 비례하며, 구체적으로 비례상수는 1이다.

가정 4는 한 시간 단위 변화에 대해서 한 단위 거리를 이동한다는 의미이다. 개별 조류 개체의 이동 거리는 단순하지 않다. 한동안 현재 위치 주변에서 짧은 거리의 이동만을 하다가, 갑자기 먼 거리를 이동하기도 한다. 이런 이동 양상을 레비 비행(Lévy flight)이라는 개념으로 설명하기도 한다(Viswanathan et al., 1996; Benhamou, 2007; Buchanan, 2008). 따라서 가정 4는 비현실적으로 보일 수 있다.

그러나 이 가정은 문제를 단순화하고, 해석적 기법을 활용할 수 있는 여지를 주기 위한 임시적 방편이다. 기존 랜덤워크 연구들이 환경과

의 상호작용을 최소화하고 진행된 반면, 이 연구는 환경과의 상호작용을 중요하게 다루고 있다. 다르게 표현하자면, 기존 연구들은 이동 방향을 고정하고 이동 거리를 변수(이동 거리의 함수)로 취급하는 반면, 이 연구에서는 거리는 상수로 제한하고 이동 방향을 위치의 함수로 표현하자는 것이다. 가정 1부터 4에 의해서, 어떤 시간에 공간 j 에서 다른 공간 k 로의 이동량 $m_{kj}(t)$ 는 식 6과 같이 결정된다.

$$m_{kj}(t) = \frac{P_k(c)}{\sum_{i \in M_j} P_i(c)} \cdot r_j(t) \quad (6)$$

여기서 $P_j(c)$ 와 $P_k(c)$ 는 각각 j 와 k 공간의 토지피복 c 에 따른 선호도이다. 공간 j 는 이웃(neighborhood)을 가지며, k 는 경우에 따라 j 이거나 j 의 이웃을 말한다. 오른쪽 항 분모의 M_j 는 j 의 이웃 전체를 의미한다. 여기서 선호도 $P_j(c)$ 와 $P_k(c)$ 는 시간에 대한 의존성이 없는 것에 주의할 필요가 있다. 선호도는 가정 1에 의해서 시간에 대해서는 상수이기 때문이다. 또한 오른쪽 항에서, 이동량이 직전 시간에 해당 위치의 활동량 $r_j(t)$ 에 비례하는 것은, 정의 4의 번식이동을 잘 표현하고 있다고 할 수 있다. 활동량이 더 많은 곳에서 더 많은 번식이 이루어지고, 번식 성공률과 이소(離巢)율도 높아진다고 생각하는 것이 타당하기 때문이다.

4) 마코프 과정 표현과 평형상태

식 3에서 특정 시간의 상태를 벡터로 표현했으며, 식 6에서는 이 상태에서 한 단위 시간의 변화에 대한 변화량의 성분들을 정의했다. 식 6에서 이동량을 결정하는 두 요소 중 작용소 부분만을 별도로 보면 다음

과 같다. 이 작용소들을 위치 관계에 따라 배열시키면 행렬로 표현할 수 있게 된다.

$$p_{kj} \equiv \frac{P_k(c)}{\sum_{i=j}^{M_j} P_i(c)}, \quad \mathbf{T} \equiv \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1M} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{M1} & p_{M2} & \cdots & p_{MM} \end{pmatrix} \quad (7)$$

여기서 p_{kj} 는 공간 j 에서 공간 k 로 이동할 확률이 되며, 행렬 \mathbf{T} 는 이 작용소들을 공간의 배치 관계에 따라 모은 것으로, 한 상태에서 다음 상태로 변화를 결정하는 전이행렬(transition matrix)이 된다. 이렇게 전이행렬 \mathbf{T} 를 정의하면 식 3에서 정의한 상태벡터의 시간에 따른 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{s}(t+1) = \mathbf{T} \cdot \vec{s}(t) \quad (8)$$

$$\vec{s}(t) = \mathbf{T}^t \cdot \vec{s}(0) \quad (9)$$

이렇게 정의된 계의 시간에 따른 변화(dynamics)는 마코프 과정(Markov process)이 된다. 모든 이동에 있어, 거리는 고정되어 있고, 방향은 그 위치에서 선호도 비율에만 의존하기 때문에, 과거의 분포나 이동과는 관련이 없기 때문이다. 여기서 더 흥미로운 점은, 토지피복에 따른 선호도가 0이나 무한대로 정의되지만 않는다면, 충분한 시간이 흐른 뒤에는 이 과정이 초기값과 상관없이 특정한 평형상태(steady state)로 수렴하게 된다는 점이다(Feller, 1968; 강우형, 2001).

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \vec{s}(t+1) = \vec{\pi} \quad (10)$$

$$\vec{\pi} = \mathbf{T} \cdot \vec{\pi} \quad (11)$$

특정 시간, 특정 위치에서 조류의 분포상태 $\vec{s}(t)$ 를 알기 위해서는, 가정 1부터 4에 의한 전이행렬 \mathbf{T} 가 결정되어야 하며, 조류의 초기 분포상태 $\vec{s}(0)$ 가 결정되어야 한다. 선호도 $P_j(c)$ 가 토지피복 유형에만 관련되어 있고 시간과는 무관하기 때문에, 현재의 토지피복을 활용할 수 있다. 토지피복에 따른 조류의 선호도 변화도, 현재 시점에서 실증적인 조사로써 결정할 수도 있다. 그러나 일반적으로 조류 분포의 초기값을 알기는 어렵다. 단지 관심 지역 내의 제한된 지점에서만 활동도를 측정할 수 있을 뿐이다. 특별한 사건이 발생해서 모든 조류가 대상지를 떠났다가 다시 돌아오는 경우나, 대상 지역이 매우 작아서 특정 시점에 강도 높은 조사를 통해서 충분히 분포를 결정할 수 있는 경우 정도가 예외가 될 것이다.

그러나 이 연구에서 제안된 가정이 성립될 수 있다면, 충분한 시간이 흐른 뒤 조류 분포는 안정적으로 예측할 수 있게 된다. 현재 상태가 평형이 아니라 할지라도, 현재 시점에서 조사된 자료를 평형 상태와 비교함으로써, 상당한 수준에서 현재 상태의 분포를 추측할 수 있게 된다. 즉, 평형상태의 존재성은 모형의 활용성을 상당히 높여주는 것이다.

5) 평형상태의 계산

초기값과 상관없이 특정 평형상태가 존재한다면, 이제 실제로 평형상태를 구해야 한다. 식 11의 평형상태 벡터 $\vec{\pi}$ 는 사실 고유값(eigenvalue) 1에 대응하는 고유벡터(eigenvector)임을 알 수 있다. 불연속 마코프 과정

의 경우 고유값은 0~1 사이에 존재하는데, 전이행렬의 대각화 과정에서 이 고유값들은 대각 성분이 된다. 평형상태로 가기위해서 시간 t 가 커지면서, 1보다 작은 성분들에 의한 기여가 거의 0으로 수렴해 가기 때문에 평형상태 벡터는 고유값 1에 대응하는 벡터가 남게 된다(Feller, 1968; 강우형, 2001). 따라서 고유벡터 $\vec{\pi}$ 가 $\vec{0}$ 이 아닌 해를 가지기 위해서는 전이행렬에서 단위행렬을 뺀 행렬이 역행렬을 갖지 않아야 하고, 확률 벡터인 $\vec{\pi}$ 의 모든 성분의 합이 1이 된다는 조건에서 구할 수 있다.

$$\vec{\pi} \cdot (\mathbf{T} - \mathbf{I}) = 0, \quad \det|\mathbf{T} - \mathbf{I}| = 0, \quad \sum_{j=1}^M \pi_j = 1 \quad (12)$$

이제까지 과정을 통해서 평형상태에서 조류의 분포를 예측하기 위한 모형의 논리를 제시했다. 평형상태 모형의 특징을 보면, 우선 평형상태에서도 이동은 발생하지만, 모든 공간에서 이동에 의한 유입량과 유출량이 균형을 이룬다. 즉 모든 공간에서 각 방향으로 이동이 발생하지만, 순이동량(net movement)은 0이다. 또 다른 특징은 시간 단위를 엄격하게 정의할 필요가 없다는 것이다. 충분히 많은 시간이 흐른 후 도달하는 상태를 계산하므로, 분할된 시간에 대해서는 고려할 필요가 없다. 마지막으로 가장 큰 특징은 모형의 결과를 얻기 위해서 초기값을 알아야할 필요가 없다는 점이다.

2. 선호도 가정

조류의 번식이동 방향을 결정하기 위해서 가정 1과 2에서 조류의 공간선택 선호도라는 개념을 도입했다. 조류의 생존을 위해 필요한 다양한

자원들을 개별적으로 다루는 방법에 비해서, 추상화된 개념으로 선호도를 정의하고, 토지피복에 대한 선호도만을 다룬다면 모형의 구조가 단순해지는 장점이 있다. 또한 공간 선호도에 의해 확률적으로 이동하는 다양한 문제들에 대해서, 동일한 논리적 틀을 적용할 수 있으며, 이를 통해서 공통적으로 존재할 수 있는 보편성을 탐색할 수단을 제공한다는 장점도 있다. 그러나 추상화된 개념을 적용할 경우에는 실제 자연의 과정을 적절하게 반영하고 있는지에 대한 세심한 주의가 필요하다.

가정 1과 2에서 제안된 공간 선호도는 개별 개체의 선호도가 아니라, 조류 개체군의 활동량 분포의 이동에 대한 경향성을 의미한다. 즉 박새류의 둥지 장소 선택과, 먹이와 둥지 자원 획득을 위한 활동을 모두 포함하는 개념이다. 이 절에서는 이 연구에서 제안한 선호도 가정이 타당성을 가질 수 있는지에 대한 몇 가지 필요조건들을 논의한다.

첫째, 조류에게 필요한 자원은 공간에 이질적(heterogeneous)으로 분포하며, 조류는 그 자원에 매우 의존적으로 활동한다.

박새류에게 필요한 자원은 둥지를 위한 적당한 장소(나무구멍 등), 둥지를 만들기 재료(풀, 이끼, 동물의 털 등), 먹이(곤충류 등) 등이다. 이들 자원은 균일하지 않게 분포하며, 특히 도시와 같이 파편화된 경관에 서는 더욱 그러하다. 곤충을 먹이로 하는 작은 새들 중 어떤 종들은, 1년 중 어떤 시기에는 그들 활동량의 대부분을 먹이 사냥에 보내는 시기가 존재한다(Smith et al., 1971; Smith et al., 1974). 박새류의 경우 번식기(4~6월경)에 그런 특성을 보이는데, 부모 두 마리의 에너지 획득에 의해 약 4~10마리 정도의 개체가 성장하고 생존해야 하기 때문이다(Smith et al., 1971; Smith et al., 1974; Pettingill, 1985; Bryan et al., 1999; 한반도

생물자원 포털). 따라서 자연선택에 따른 결과이겠지만, 이 시기 박새류의 활동은 매우 자원 의존적이라고 할 수 있다.

둘째, 조류는 자원 획득 효율을 높일 수 있는 방향으로 행동한다.

공간 선호도를 가정하기 위해서는 자원에 의존적으로 활동할 뿐 아니라, 그 활동 양상도 자원 획득 효율을 최적화하는 경향을 가져야 한다. 많은 조류들이 이러한 경향을 보이는 것으로 보고되었는데, 그 최적화 경향은 크게 먹이 선택에서 최적화, 조각(patch) 선택에서 최적화, 하나의 조각 내에서 사냥 시간 배분의 최적화, 그리고 조각들 사이에서 이동 경로 선택의 최적화로 구분할 수 있다(Pyke et al., 1977).

많은 조류들에 있어서 둥지 선택의 가장 중요한 기준은 포식자와 교란으로부터 보호 정도이다(Li et al., 1991; Steele, 1993; Brown, 1999). 한편, 둥지를 유지하는 시기에는 많은 먹이 자원이 필요하며, 따라서 먹이 자원을 구하기 쉬운 곳의 주변에 둥지를 만드는 것이 유리하게 된다(Pyke et al., 1977). 보호 정도도 높고 먹이를 주변에서 쉽게 구할 수 있는 장소가 가장 좋겠지만, 일반적으로 이 두 가지 목표는 상반되는 경우(trade-off)가 많다. 따라서 둥지 장소의 선택 과정은 적절한 수준에서 두 가지 상반되는 목표를 최적화하는 과정이 된다(Brown, 1999). 유럽 딱새(*Ficedula hypoleuca*)의 경우에는 암컷이 수컷 자체가 아닌 그 둥지의 질을 보고 선택한다는 보고가 있는데(Slagsvold, 1986), 이런 경우에는 특히, 둥지 선택의 최적화는 자연선택의 결과로 자연스럽게 연결된다.

일단 둥지 위치가 선택된 후에는 주변 공간에서 수렵 활동이 이루어질 것이다. 둥지에서 먹이가 존재하는 특정 조각(patch)으로 이동하고, 어느 정도의 시간동안 먹이를 찾다가, 결국 어떤 시간에는 다른 조각으로

이동하거나 등지로 돌아갈 것이다. Krebs 등(1974)은 북미산 박새(*Parus atricapillus*)들이 조각에 존재하는 먹이양에 따라 각 단계별로 어떻게 시간을 배분하는지 실험하고, Charnov(1976)은 그 자료에 기초해서 박새의 시간 배분에 대한 수학적 모형을 개발했다. 이 보고들에서, 박새들은 특히 사냥 포기 시간(giving-up time)을 적절하게 배분해서, 전체 수렵 활동에서 먹이를 획득하는 효율을 극대화하려는 경향을 보였다(Krebs et al, 1974; Charnov, 1976; Pyke et al., 1977).

셋째, 자원 획득 과정에서 조류는 자원이 많은 공간 유형을 학습하고 기억한다.

토지피복 유형에 따른 경향성을 가정하기 위해서는, 위에서 논의된 최적화 경향이 단순히 본능에 의해 발현될 뿐 아니라, 환경과의 상호작용을 통한 학습 과정을 거쳐 형성되고 기억될 수 있어야 한다. 일반적으로 박새류는 등지를 떠난 이후에는 무리생활을 하며, 환경에 따라 보다 다양한 먹이를 먹는다(한반도 생물자원 포털). 무리생활에서 공간의 생산성이 학습되고 기억된다면, 그리고 위에서 가정한 최적화 경향이 존재한다면 등지 위치나 활동 분포가 공간적 선호도를 가진다고 얘기할 수 있을 것이다.

몇 가지 연구 결과를 보면, 박새류가 여러 번의 시도를 거쳐 문제를 해결하고(Sasvári, 1979), 생산성이 높은 공간을 인식한다는 보고가 있다(Smith et al., 1971; Smith et al., 1974). 특히 후자의 연구에서, 박새들은 서로 다른 먹이양을 가진 조각들을 학습할 뿐 아니라, 그 양에 따라 사냥 시간을 배분했다. 조각에서 얻을 수 있는 먹이양이 달라진 경우에는, 먼저 기존 기억에 따라 시간을 배분하다가 점차로 달라진 환경에 적응하

는 것으로 보고됐다. 심지어는 초기에 먹이가 없다고 인식한 곳에는, 먹이양을 충분히 늘린 후에도 대부분의 박새가 찾지 않은 것으로 보고됐다 (Smith et al., 1971; Smith et al., 1974).

땅벌의 비행경로를 추적한 또 다른 연구에서는, 주변 환경과는 독립적으로 움직이다가 먹이를 발견한 경우에만 경로를 바꾸고 먹이에 집중한다는 가설이 기각되고, 꽃의 개화순서에 따라 이동 경로가 정해지는 것으로 보인다고 보고했다(Pyke, 1978). 학습된 기억을 바탕으로 이동 경로와 조각을 선택하며, 상대적으로 질이 떨어지는 조각에도 적게나마 시간을 배분하는 것은, 효율을 높이고 자연의 변화에 적절히 대응하기 위한 자연선택의 결과로 생각될 수 있다(Pyke, 1977).

넷째, 그 공간 유형은 토지피복 유형으로 표현할 수 있다.

토지피복(landcover)은 지표면을 덮고 있는 물리적 상태를 의미한다 (수원시, 2010). 다양한 주체들에 의해서 토지피복 지도가 만들어지고, 그 때마다 포함되는 요소는 다르지만, 대체로 도로나 건물과 같은 인공 구조물과 초지나 산림과 같은 식생 뿐 아니라, 나출된 토양이나 암석, 그리고 수면을 모두 포함하는 경우가 많다.

박새류에게 필요한 자원은 크게 둥지 장소로써 나무나 인공 구조물에 있는 구멍이나 틈새, 둥지 재료로써 이끼나 풀 또는 동물의 털, 그리고 먹이로써 곤충류와 물 등이다(한반도 생물자원 포털). 구체적으로 보면 산림 피복 내에서도 이런 자원의 공간적 분포는 이질적이겠지만, 전체적으로는 도로나 건물과 같은 인공적인 피복에서보다는 산림이나 초지에서 더 많은 자원이 존재할 것이다. 또한 Smith 등(1971)과 Smith 등(1974)의 결과를 고려할 때, 동일한 유형의 피복들 사이에 존재하는 자원

양의 미세한 변화는 박새류의 환경 적응 과정에서 평균적인 경향성으로 수렴된다고 가정할 수 있을 것이다.

다섯째, 개별적인 경향을 가진 많은 개체들이 독립적으로 활동할 때, 이 결과는 평균적인 개체의 활동으로 수렴한다.

이제까지의 논의를 종합할 때, 조류의 공간 선택에 있어서 선호도는 특정 개체나 종의 고유 특성, 시간, 공간, 그리고 자원의 함수로 생각할 수 있다. 이 연구에서는 대상을 박새류로 한정하며, 시간과 공간을 번식기의 도시와 그 주변 생태계로 한정한다. 따라서 선호도는 개체 고유의 특성과 자원에만 의존하는 함수가 된다. 다시 한 번, 적절한 시간과 공간 범위 내에서, 많은 개체들이 참여하고 충분히 많이 반복되는 선택 과정을 다룬다면, 각각의 공간 선택 과정들은 어떤 표준적인 선호도를 가진 개체의 선택들로 수렴할 것이다.

위의 모든 논의에 따라 이 연구에서는, 특정 도시와 그 인접 생태계에서, 번식기 박새류는 토지피복에 따른 일정한 공간 선호도를 갖는다고 가정한다.

3. 대상지와 자료 수집

1) 대상지 개요

모형의 적용 대상지는 수원시이다. 수원시는 2011년 기준, 면적은 121.05km²이며 인구는 1,078,163명이다(수원시 홈페이지). 80% 이상이 고도 100m 이하의 낮은 구릉지이며, 전반적으로는 남향이다.

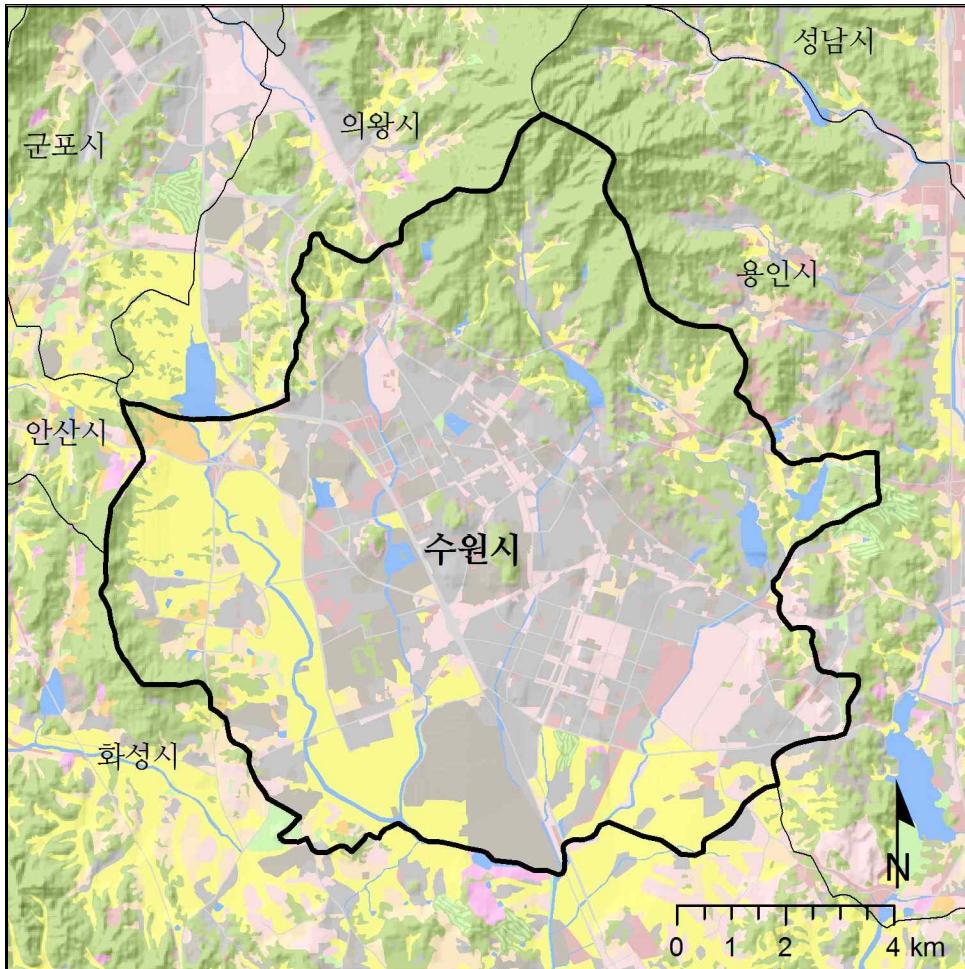


그림 5 수원시 대상지 개요.

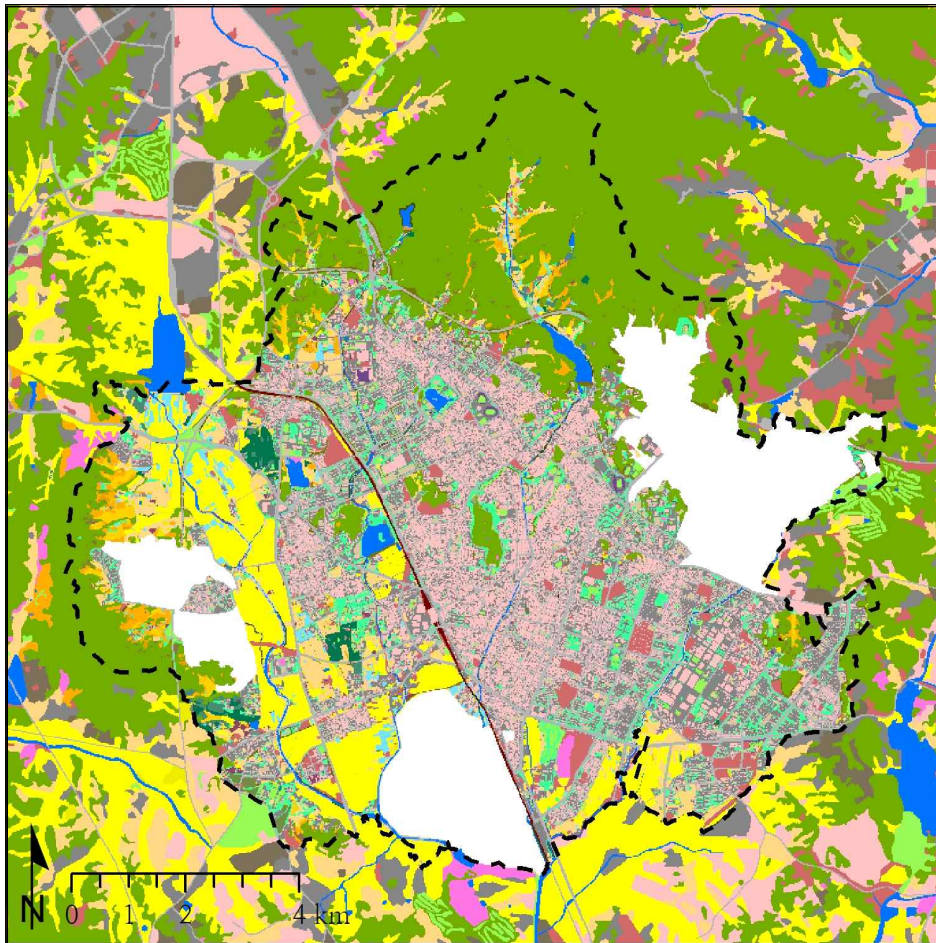
북쪽에 광교산이 있고, 서쪽에는 칠보산이 있으며, 주요 하천으로는 황구지천, 수원천, 원천천이 북쪽에서 남쪽으로 흐르고 있고, 주로 도시 북쪽으로 7개의 주요 저수지가 있다. 도시 내 39% 이상이 불투수 지역이며, 토지이용상 36% 이상이 시가지지역이다(수원시, 2010).

2) 토지피복

가정 3에 따른 조류의 선호도 결정을 위해서 수원시(2010)의 토지피복지도를 활용했다. 이 자료는 1:1,000 또는 1:5,000 수치지형도와 지상해상도 25cm급의 항공사진을 이용해 초안을 작성하고, 보안지역과 택지개발지구를 제외한 전 지역을 현장조사한 후, 그 결과에 따라 수정편집해서 작성한 지도이다(수원시, 2010). 그러나 수원시 토지피복지도는 수원시 행정 경계까지만 작성되어 있다. 따라서 행정 경계에서 모형의 경계 효과가 발생할 것을 예상할 수 있다.

모형의 경계효과 제거를 위해서 환경부 토지피복도를 활용해서 수원시 외곽까지 토지피복지도를 확장했다. 환경부 토지피복도는 2006년 기준으로 제작된 지도로, 위성영상 또는 항공사진과 1:5,000 또는 1:25,000 수치지형도를 참고로 초안을 작성하고, 부분적인 현장 검증을 통해서 작성됐다. 지도의 기준 축척은 1:25,000이다(환경부 EGIS).

두 자료는 기준시점, 해상도, 정확도 등의 측면에서 사실상 매우 다르다. 대체로 수원시 자료가 더 최근이며, 더 자세하고, 더 정확하다. 그러나 이 연구의 대상지는 수원시 내부지역이며, 그 외곽의 토지피복은 경계효과를 완화시키기 위함이 주목적이다. 따라서 보조 자료로써 환경부 토지피복도를 병행하는 것은 큰 무리가 없을 것으로 판단했다.



범례

건물	포장지(투수)	조림지	산림
도로	밭	묘포원	인공수면
포장지	밭(비관리)	흙제방(교목)	논
구조물	묘지	조경녹지(교목)	논(비관리)
비닐하우스	방목지	나지	수면
철도	성절토(식생)	모래	습지자연식생
공지	흙제방(초본)	자연초지	보안지역
운동장	조경녹지(초본)	농경지기타	기타
비포장도로	과수원	농경지기타(비관리)	택지개발지구
성절토(비식생)	과수원(비관리)	관목림	

그림 6 수원시와 인접지역 토지피복.

3) 조류 현장 조사

조류 현장조사는 수원시(2010) 조사 결과를 활용했다. 조사는 2009년 5월부터 6월까지 번식기에 진행됐고, 조사 시간은 새벽부터 오전 11시까지 진행했다. 조사 방법은 정점 조사방법을 이용했고, 총 100개의 조사지점에서 시도됐다. 각 지점에서 5분간 채류하면서 반경 25m, 50m, 100m 내에 출현한 종들의 개체수를 대략의 위치와 함께 기록했다. 조사 야장에는 주변 환경 정보를 함께 기입해서 조사 위치나 주변 환경과 맥락을 조사 후에도 확인할 수 있었다(수원시, 2010).

시도된 100개의 조사지점들 중 GPS 위치 기록에 오류가 있는 경우, 야장과 조사도면에서 지점 번호가 일치하지 않는 경우, 야장에 기술된 주변 환경 특성이 해당 위치와 현저하게 다른 경우, 조사 당시 대규모 공사가 진행되는 지역에서 조사된 경우 등을 제외하고, 이 연구에서는 총 79개 조사지점 자료만 활용됐다. 조사지점은 가급적 수원시 전역에 분포하고, 서식환경이 좋은 곳부터 나쁜 곳을 모두 포함하도록 배치됐다. 따라서 어떤 지점에서는 조류가 전혀 발견되지 않은 경우도 있다. 조사 지점간 거리는 최소 167m에서 최대 1.7km였으며, 평균 거리는 497m였다(그림 7).

조사 결과 총 12목 26과 55종이 관찰됐고, 그중 소쩍새(*Otus scops*), 붉은배새매(*Accipiter soloensis*), 황조롱이(*Falco tinnunculus*) 등 천연기념물로 지정된 종도 3종이 발견됐다. 가장 많은 지점에서 발견된 종은 까치(*Pica pica*)로 80%가 넘는 조사지점에서 발견됐고, 직박구리(*Hypsipetes amaurotis*), 참새(*Passer montanus*), 멧비둘기(*Streptopelia orientalis*) 등 흔히 도시에 잘 적응하는 것으로 알려진 종들이 출현 빈도가 높았다. 산림성 조류들은 일반적으로 출현 빈도가 낮았다. 전체적으로도 출현 빈도가 10% 미만인 종이 34종이었고, 전체 발견종의 약 2/3에 해당하는 64%

의 종들이 일부 조사 지역에서만 출현했다(수원시, 2010).

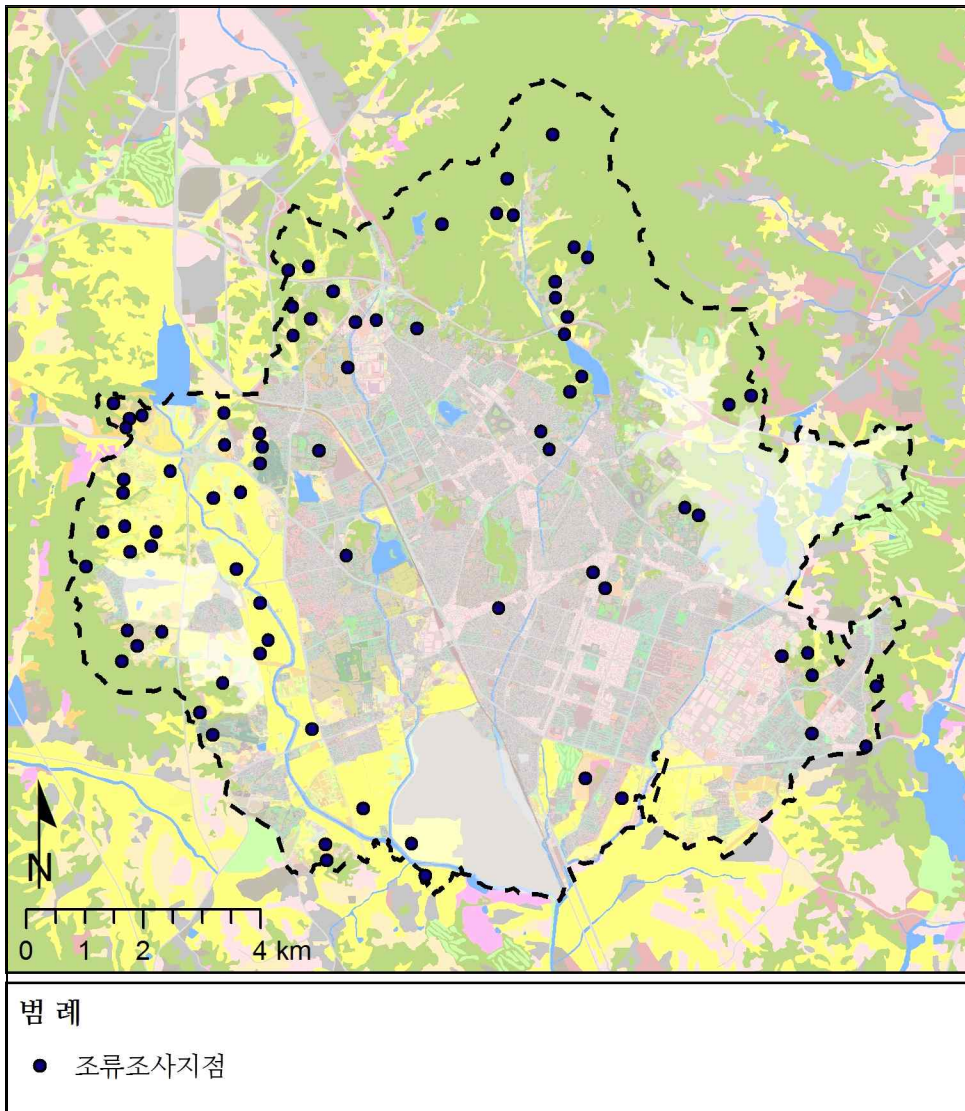


그림 7 수원시 조류조사 유효 지점(79개 지점).

발견된 전체 종들 중에서 정의 1에 의해서 이 연구의 대상이 되는 종들을 선택했다. 발견 종들은 박새와 쇠박새, 그리고 곤줄박이이며 총 발견 빈도는 115번이었다. 또 다른 박새류인 진박새(*Parus ater*)나 북방 쇠박새(*Parus montanus*) 등은 출현하지 않았다. 표 2는 이 연구의 대상종들의 목록과 기록된 출현 개체수이다(수원시, 2010).

표 2 수원시 출현종 중 이 연구의 대상종들인 박새류 출현 개체수.

목	과	종	학명	개체수
참새목	박새과	쇠박새	<i>Parus palustris</i>	43
		박새	<i>Parus major</i>	70
		곤줄박이	<i>Parus varius</i>	2
계				115

4. 수원시 평형 상태 모형 구현

1) 모형의 구현

대상지는 경계효과를 완화시키기 위해서 수원시와 그 인접지역까지로 확대했다. 그 결과 대상지는 수원시를 중심으로 가로와 세로 모두 약 16.5km의 정사각형으로 면적은 약 172.3km²였다. 이 공간을 정사각형의 격자(20m×20m)들로 균일하게 구분하고, 조류의 이동은 이 격자 단위로 이루어지도록 했다. 가정 4에 따라서, 한 시점에서 다음 시점으로 시간의 경과에 따라 모든 조류는 한 격자씩 이동하는 것으로 가정했다. 이동 방향은 동서남북 4방향으로 한정하고 대각선 방향의 이동은 없는 것으로 가정했다. 대상지 경계에서 바깥쪽으로 이동은 없도록 했다(그림 8).

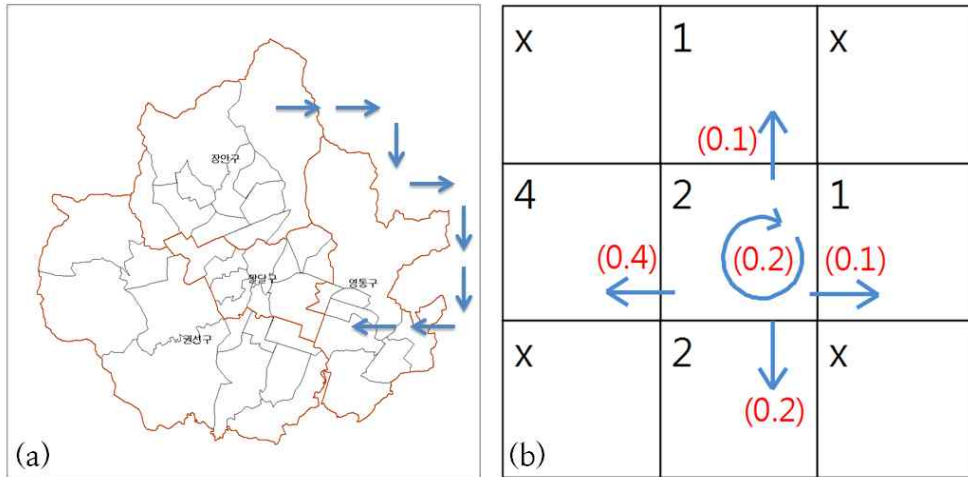


그림 8 조류의 이동 방법. (a) 수원 외곽으로는 갈 수 있으나, 대상지 밖으로는 나가지 못한다. (b) 동서남북 네 방향과 가운데 격자의 선호도 비율에 따라 이동 방향이 확률적으로 결정된다.

가정 3에 따라서, 한 단위 시간이 변할 때, 한 지점에서 조류의 이동 방향은 주변과의 선호도 비율에 따라 확률적으로 정해지도록 했다. 예를 들어 그림 8에서 가운데 격자는 출발점을 나타내고 있는데, 다음 시간으로 변화할 때, 서쪽 격자로 이동할 확률은 0.4로 가장 크고, 북쪽과 동쪽으로 이동할 확률은 0.1로 가장 낮으며, 현재 위치에 머물거나 남쪽으로 이동할 확률은 0.2가 된다. 구체적으로 모든 공간에서 선호도를 부여하는 과정은 다음에 이어질 선호도 부분에서 다루도록 한다.

2) 선호도

가정 1과 2에 의해서 조류의 이동방향 확률이 결정되도록 했지만, 실제 선호도를 결정하는 것은 매우 어려운 문제이다. 이 모형에서 연구자의 주관적 판단이 가장 많이 개입될 수 있는 부분이다. 조절 가능한

매개변수는 모형의 적응성을 높이기 위해서는 필요한 부분이지만, 모형 예측의 신뢰도에 좋지 못한 영향을 주는 부분이기도 하다.

잘 설계되고 적절하게 통제된 실험을 통해서 선호도를 측정해보는 것이 가장 바람직한 방법이겠지만, 불행히도 현재까지 그런 자료는 없다. 따라서 이 연구에서는 간접적인 방법으로 선호도를 결정할 수밖에 없다. 이런 상황에서 가능한 현실성을 가지면서도 최소한의 논리적 일관성을 유지하기 위해서, 세 가지 방법을 이용해 선호도를 결정하고 타당성을 검토했다.

첫 번째로 선호도를 결정하는 과정을 상대적 선호 정도만 구분하는 순서화 단계와 구체적인 수치를 부여하는 척도화 단계로 나눠 진행했다. 두 번째로, 이렇게 결정한 선호도를 전문가 설문 결과와 비교했다. 마지막으로 수원시를 대상으로 구현된 모형을 성남시에 적용해서, 수원시에 서 결정된 선호도의 타당성을 간접적으로 검토했다.

(1) 선호도 결정

많은 연구들이 토지이용 또는 토지피복에 따른 조류의 분포 양상을 다루고 있다. 이러한 연구 결과를 살펴보면, 토지이용이나 토지피복에 따른 분포 경향은 어느 정도 일치하나, 구체적인 분포 정도는 다소 차이를 보인다(Blair, 1996; Hadidian et al., 1997; Blair, 1999; Mörtberg, 2001; Lee et al., 2007; 성남시, 2004; 수원시, 2010). 따라서 이 연구에서는 선호도 결정 과정을 두 단계로 나누어 진행했다. 첫 번째 단계는 순서화(ordering) 단계로, 토지피복에 따른 구체적인 선호도 값을 결정하지 않고, 단지 토지피복들을 상대적으로 비교하여 우선순위만 결정하는 과정이다. 이 단계에서는 현장조사 결과와 상관없이, 기존 문헌들을 검토하여 상대적 우선순위만을 결정했다. 문헌에서 찾을 수 없는 유형의 토지피복

은 유사한 토지피복을 참고하여 결정했다.

두 번째 단계는 척도화(scaling) 단계로, 우선순위가 구분된 토지피복 유형별로 구체적인 수치를 부여하는 과정이다. 이 연구에서는 수원시 (2010)의 현장조사 자료를 활용해서 대략의 범위를 정했다. 유효 조사지 점의 수는 79개(그림 7)이며, 발견된 개체수 출현 빈도는 115번(표 2)이고, 지점 당 평균 빈도는 약 1.45번이며, 표준편차는 약 1.9이다(수원시, 2010). 따라서 평균적으로 0~3번 정도의 출현이 있는 경우가 대부분이라고 생각할 수 있다. 이와 유사하게 선호도 값은 최소 1에서 최대 2까지로 조정했다. 그 사이에 존재하는 값들은 최대값과 최소값 사이에서 어느 쪽으로 더 가까울지를 판단해서 결정했다(표 3).

이렇게 두 단계를 구분해 선호도를 결정하는 것은, 불확실성의 원인이 되는 부분을 구분하고, 모형의 불확실성에 대한 대응을 질적인 부분과 양적인 부분으로 구분할 수 있도록 하는 장점을 가진다. 토지피복 유형에 대한 상대적 우선순위는 많은 기존 연구들에서 비교적 일치하는 경향을 가진다(Blair, 1996; Hadidian et al., 1997; Blair, 1999; Mörtberg, 2001; Lee et al., 2007; 성남시, 2004; 수원시, 2010). 따라서 질적인 분류 과정인 순서화(ordering) 단계는 논리적으로 오류의 가능성이 덜할 것으로 판단된다. 그러나 구체적인 선호도 값을 양적으로 결정하는 문제는 더 어렵다. 이 연구들에서 보고된 출현 빈도수가 선호도를 직접 의미하지는 않기 때문이다.

관측된 빈도수가 곧 선호도를 의미하는 것이 아니라, 가정 1부터 3에 따라, 지엽적(local) 선호도 차이가 활동량의 확률적 이동을 발생시키고, 공간적인 맥락(context) 속에서 누적된 이동의 결과가 출현 빈도로 나타나는 것이다. 따라서 특정 공간에서 출현 빈도만으로는 선호도를 정확하게 추정할 수 없고, 여러 공간들에 대해서 각각 얼마의 비율로 선택되

는지에 대한 자료들이 필요하다. 현재까지 이러한 실측자료는 없으며, 선호도 결정의 불확실성은 이 부분에서 더 클 것이다.

그러나 평형상태만을 생각한다면, 선호도의 상대적 순서가 고정된다면 구체적 값의 다소간 변화가 모형의 예측 결과에 미치는 영향은 제한적일 것으로 기대할 수 있다. 이는 다수의 연구 결과에서 동일한 경향을 보인다면, 적어도 평형 모형에 대해서는 특정 지역에서 관측된 빈도 값들을 선호도 결정 기준으로 활용할 수 있음을 의미한다. 따라서 평형상태 모형 개발을 위해서는, 기존 연구들을 활용해 상대적 선호 순서를 결정 한 후, 이 연구 대상지에서 실측된 자료들을 활용해서 구체적인 선호도를 결정하는 접근 방법이 충분한 의미를 가질 수 있을 것으로 판단했다. 구체적인 선호도 값의 부분적 변화가 모형에 미치는 영향은, 불확실성 분석(Uncertainty Analysis)나 민감도 분석(Sensitivity Analysis) 등을 통해서 정량적으로 대응할 수 있을 것이다.

(2) 전문가 설문

이렇게 결정된 선호도와 비교를 위해, 별도로 전문가 설문을 통해서도 다른 선호도 값을 결정했다. 전문가 설문은 2012년 6월 1일부터 2012년 8월 2일까지 총 6명의 조류 생태 관련 전문가들을 대상으로 이메일을 통한 설문으로 수행됐다. 설문지 문항은 최대한 단순하게 구성해서, 수원시 토지피복 유형을 제시하고 박새류의 공간 선호도를 추측하도록 했다.

수원시의 토지피복은 모두 38가지로 구분되어있다. 이 모두에 대해서 정확하게 선호도를 구분한다는 것은 매우 어려울 뿐 아니라, 선호도 부여 과정에 일관성을 유지하기도 어려울 것이라 판단했다. 따라서 비슷한 유형의 토지피복을 하나의 대표 유형으로 묶어 모두 11개의 대표 토지피복으로 구분했다. 설문은 이 11개의 대표 유형에 대한 선호도를 결

정하도록 했다. 선호도 결정 과정은 이 연구에서 제시한 과정과 동일하게 순서화(ordering) 단계와 척도화(scaling) 단계로 구분해서 진행하도록 했다. 구체적인 척도는 1점부터 10점 사이에서 소수점 첫째자리까지 상대적인 점수를 부여하도록 했다.

1~10점 척도로 작성된 각 답변들은 토지피복별로 산술평균을 취한 후, 현장조사 결과와 비교를 위해 이 연구에서 결정한 1~2점 척도로 조정했다. 표 3은 전문가 설문에 의해 결정된 선호도와 이 연구에서 결정한 선호도를 비교한 결과이다. 대략 비슷한 경향을 보이나, 연구자가 결정한 선호도에 비해, 전문가 집단은 농경지와 관련된 토지피복에 대해 다소 높은 점수를 부여하고, 묘지, 관목림, 식생 피복된 성절토 등의 녹지들에 대해서는 다소 낮은 점수를 부여했다.

표 3 수원시 토지피복에 따른 선호도.

토지피복	선호도		토지피복	선호도	
	P1	P2		P1	P2
도로	1.17	1.00	흙제방(초본)	1.47	1.45
택지개발지구	1.00	1.08	묘포원	1.50	1.57
공지	1.00	1.08	조림지	1.47	1.61
포장지	1.07	1.10	구조물	1.50	1.61
포장지기타(투수)	1.07	1.10	비포장도로	1.50	1.61
비닐하우스	1.08	1.20	논(비관리)	1.88	1.69
운동장	1.08	1.20	기타	1.50	1.71
건물	1.17	1.20	모래	1.88	1.71
인공수면	1.08	1.20	밭(비관리)	1.88	1.78
보안지역	1.00	1.24	과수원(비관리)	1.88	1.78
성절토(비식생)	1.25	1.24	묘지	1.47	1.82
철도	1.25	1.24	방목지	1.47	1.82
논	1.13	1.24	수면	1.47	1.82
과수원	1.57	1.29	관목림	1.50	1.86
조경녹지(초본)	1.16	1.30	농경지기타(비관리)	1.88	1.90
농경지기타	1.16	1.33	조경녹지(교목)	1.64	1.94
성절토(식생)	1.16	1.39	자연초지	1.64	1.98
나지	1.25	1.40	습지자연식생	1.64	1.98
밭	1.57	1.40	산림	2.00	2.00
흙제방(교목)	1.47	1.45			

선호도 1: 낮음, 선호도 2: 높음

P1은 전문가 설문 결과의 평균, P2는 2단계 방법으로 이 연구자가 결정한 선호도.

3) 평형상태 예측결과

(1) 조류 활동 예측 결과

2009년 현재 상황의 토지피복에 따른 선호도가 충분한 시간동안 유지될 경우 도달하게 될 평형 상태를 계산했다. 결과는 각 격자별 확률값으로 표현되는데, 평형 상태에서 전체 조류 개체군에 대한 해당 공간에서의 활동 비율을 의미한다. 그림 9는 평형 상태에 대한 모형 예측과 현장 조사 지점에서 발견된 개체수를 함께 표현한 지도이다. 요구되는 입력 자료가 토지피복 하나뿐이며 모형에서 필요한 매개변수가 토지피복에 따른 선호도뿐이므로, 모형의 구조는 다른 서식처 모형들과 비교할 때 매우 단순하다 할 수 있다. 그러나 그 결과는, 생태계에 대한 인간의 영향을 보여줄 수 있는 토지이용에 따른 공간적 양상을 잘 보이고 있으며, 현장조사 결과와도 유사성을 보였다(그림 9).

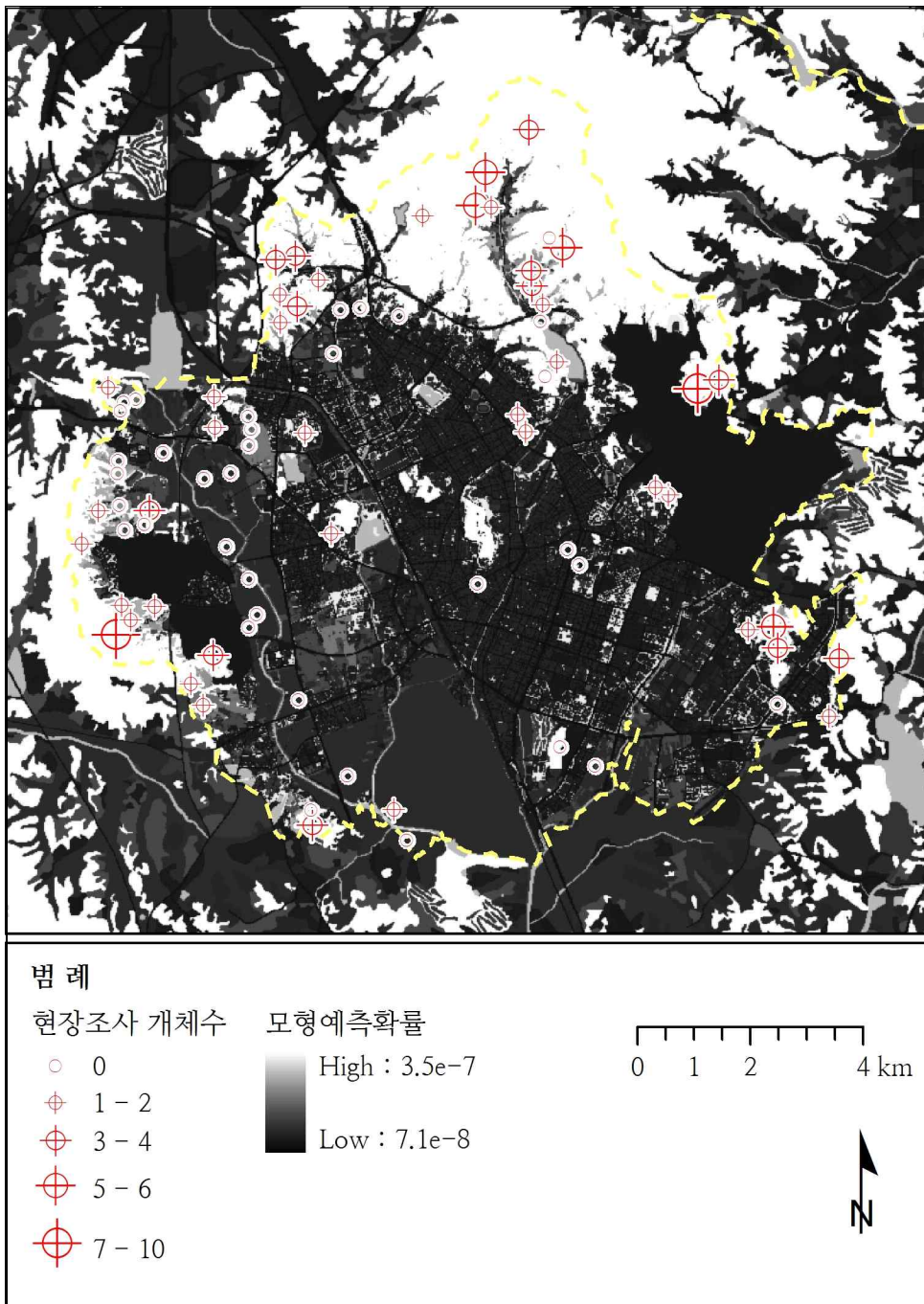


그림 9 수원시 평형상태 예측 결과와 현장조사 결과 비교.

예측된 활동도는 정의 2와 3, 그리고 그림 4에 따라 해석하면 조류의 잠재적 개체수로 해석될 수 있다. 또한 평형상태에서는 각 격자에서 다른 격자들로 이동은 있지만, 순 이동량은 0이라는 점을 상기할 때, 이 값은 조류의 활동량으로 해석할 수도 있다. 이 경우 수원시 전체에서 조류의 개체수 또는 활동도가 어떤 분포를 가지는지는 흥미로운 정보이다. 그림 10은 수원시 전체에 대한 모형에서 예측된 확률의 분포를 표현한 도수분포표이다.

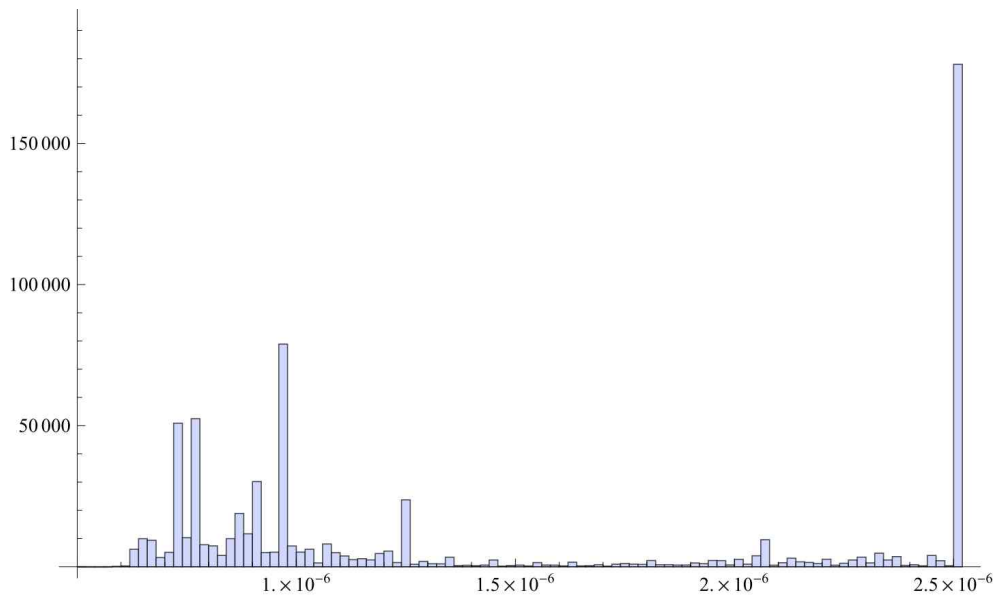


그림 10 평형상태 예측결과 확률분포.

이 도표에서 알 수 있듯이, 개체들이 거의 존재하지 않아서 활동도가 매우 낮은 격자들이 매우 높은 빈도를 보이고 있으며, 상대적으로 많은 개체들이 집중돼서 활동하는 격자들이 매우 높은 빈도를 보였다. 이 결과는 일반적인 자연 현상을 측정할 때, 그 결과가 종형 분포 또는 그와 유사한 분포를 보이는 것과는 아주 다른 결과이다. 참고로 표 4는 정

구분포에 대한 몇 가지 적합도 검정을 이 분포에 적용한 결과인데, 시각적으로도 확인할 수 있는 것처럼, 정규분포 또는 그와 유사한 분포일 가능성은 거의 0이라는 것을 표현하고 있다.

표 4 몇 가지 정규성 검사 결과.

구 분	통계치	P 값
Anderson-Darling	64,619.3	0
Cramér-von Mises	10,651.7	1.0×10^{-13}
Jarque-Bera ALM	96,169.6	$1.0 \times 10^{-20,883}$
Pearson χ^2	2.7×10^7	0

(2) 현장 조사 자료와 비교

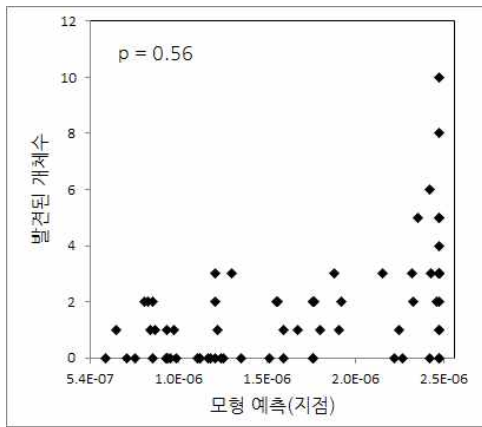
수원시 환경이 충분히 평형에 도달했다고 가정하기는 어려울 것으로 판단된다. 크고 작은 변화가 계속 발생하는 도시 환경이기 때문이다. 그러나 도시의 모든 곳에서 대규모 교란이 항상 존재한다고 생각하기는 어렵다. 큰 교란은 보다 가끔 발생하고, 작은 교란들은 보다 자주 발생한다고 생각하는 것이 타당할 것이다. 그런 경우 부분적으로는 평형상태와 상당히 비슷한 곳들이 존재할 것이다.

동물의 적응 능력에 따라서 평형으로 수렴하는 시간은 달라질 수 있다. 일반적으로 동물들은, 현재 자신의 영역에 교란이 주어지면, 가급적 짧은 시간 안에 보다 넓은 범위의 공간을 탐색하고, 자신의 필요를 최대한 충족시킬 수 있도록 공간을 선택하려 노력할 것이다. 조류는 이동성이 가장 큰 동물군이다. 따라서 공간적 적응성은 다른 어느 분류군들보다 크다고 할 수 있을 것이다. 활동이 평형에 도달하는 시간이 비교적

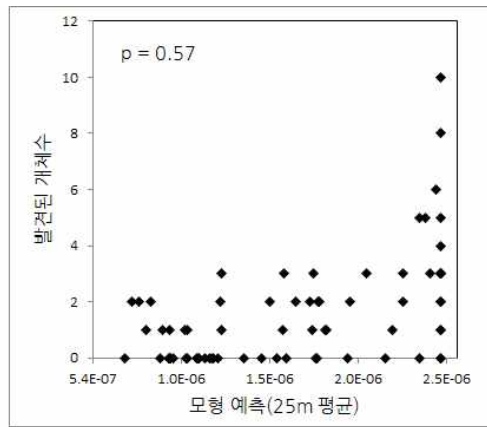
짧을 것이라고 추측할 수 있다. 이런 점들을 고려할 때, 평형상태 예측 결과를 현장조사 결과와 비교해보는 것은 충분한 의미가 있을 것으로 판단된다.

또 다른 문제는 두 수치가 조금은 다른 의미를 가진다는 문제이다. 모형의 예측치는 전체 조류 개체군의 활동량에 대한 해당 격자와 관련된 활동량의 비율이다. 논리적으로 0에서 1 사이의 척도를 가지는 연속적인 값이 된다. 반면에 현장조사 결과는 해당 지점에서 조류 개체의 출현 빈도를 기록한 것이며, 불연속적인 값이다. 그러나 정점 조사시 조사시간을 5분으로 통일했으므로, 조사가 적절하게 이루어졌다면 조사 결과는 그 지역의 활동량에 비례한다고 생각할 수 있고, 비교적 한정된 조사시기를 고려할 때 전체 개체군의 크기에도 큰 변화가 없을 것이라 가정할 수 있으므로, 두 변수간에 양적인 비교가 가능할 것으로 판단된다. 따라서 두 변수간 상관관계는 피어슨 상관계수를 이용해 측정했다.

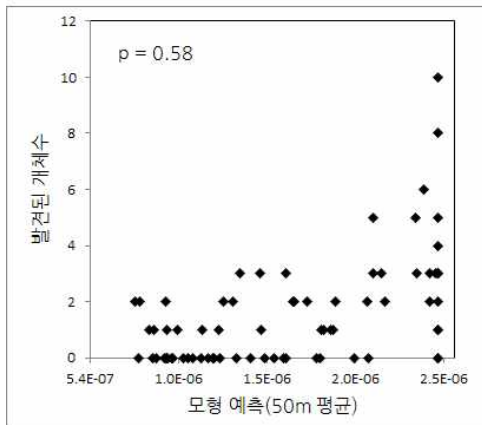
현장조사가 지점 중심에서 반경 100m 이내에 출현하는 개체들을 기록하도록 설계되었으므로(수원시, 2010), 모형 예측치 비교도 이에 따르도록 했다. 현장조사 지점에서의 예측치와, 반경 25m 이내의 예측치 평균값, 반경 50m 이내의 예측치 평균값, 그리고 반경 100m이내의 예측치 평균값을 각각 현장조사 결과와 비교했다(그림 11). 비교 결과 모두 0.56 이상의 양의 상관을 보였다. 평균 반경이 커질수록 상관이 높아졌는데, 평균 반경 100m의 경우에는 피어슨 상관계수가 0.61까지 높아졌다. 이는 100m 거리 이내 출현 개체를 모두 조사하도록 한 현장조사 결과와 부합되는 것으로 판단된다. 모형의 적합도 검정은 카이 제곱 적합도 검정을 이용했으나 유의성을 보이지는 않았다.



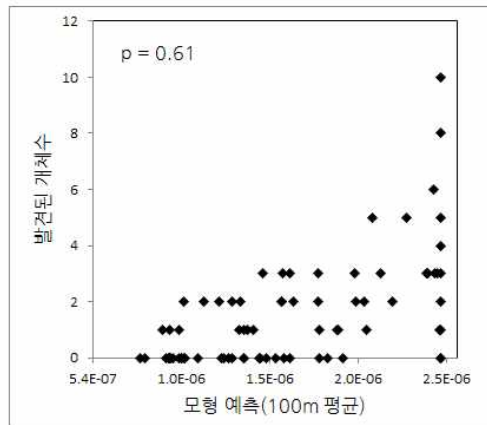
(a)



(b)



(c)



(d)

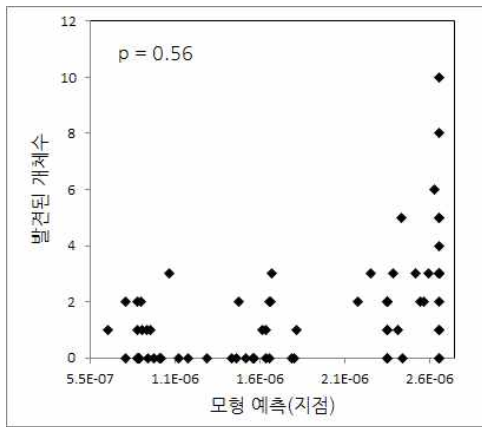
그림 11 수원시 모형 예측과 현장조사 결과 비교. 각각 (a)는 지점 예측치, (b)는 반경 25m 예측치 평균, (c)는 반경 50m 예측치 평균, (d)는 반경 100m 예측치 평균과 현장조사 결과 비교.

(3) 전문가 설문에 의한 선호도와 비교

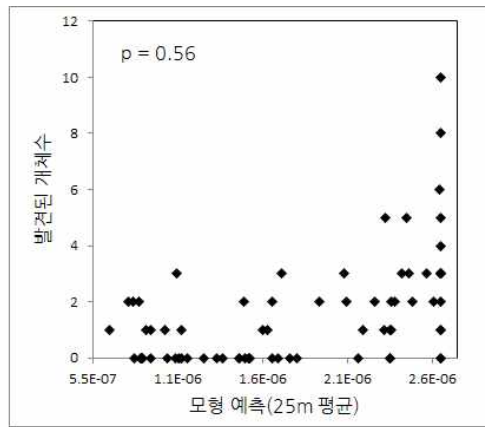
전문가 집단을 대상으로 한 설문을 통해 결정된 두 번째 선호도 집합을 이용해 수원시 평형상태 모형을 다시 구축했다. 선호도 결정에 활용된 토지피복 자료는 이미 사용했던 자료를 그대로 활용했다. 전문가 집단의 선호도 집합이 연구자의 선호도 집합과 대략 비슷한 경향을 가졌으므로, 전문가 집단 설문 선호도에 평형 모형 결과는 연구자의 결과와 시각적으로는 크게 차이가 없었다.

전문가 집단 설문 선호도에 의한 모형 결과도 현장조사 결과와 비교했다. 이 경우도 현장조사 지점에서의 예측치와, 반경 25m 이내의 예측치 평균값, 반경 50m 이내의 예측치 평균값, 그리고 반경 100m이내의 예측치 평균값을 각각 현장조사 결과와 비교했다(그림 12). 비교 결과 최소 0.56에서 최대 0.59(100m 평균)의 양의 상관을 보였다. 이 경우도 평균 반경이 커질수록 상관이 높아졌는데, 다만 25m 평균 반경의 경우는 그렇지 않았다(그림 12).

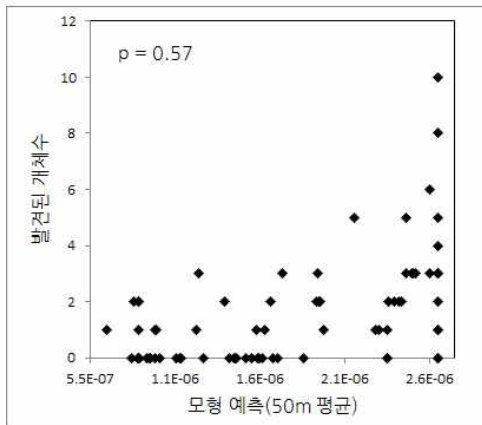
전문가 설문에 의해 구성된 선호도를 이용한 모형과 연구자가 선택한 선호도에 의한 모형을 비교하면, 네 가지 경우 모두, 연구자의 모형에서 현장조사 결과와 높은 양의 상관을 보였다(그림 11과 그림 12). 그림 12에서 시각적으로 판단해볼 때, 중간 정도의 활동량을 예측하는 부분에서 현장조사 결과와 다른 경향을 보인다고 판단된다(그림 12의 a, b, c). 그러나 모형의 예측이 현재 상황보다는 평형 상태를 예측하고 있으며, 선호도 결정 과정에 다양한 불확실성 요소들이 존재한다는 점, 그리고 모형의 논리가 현실을 완벽하게 묘사하지 못하는 부분이 존재하는 등을 고려할 때, 현재로써는 모형의 정확성을 직접 비교해 평가하는 것은 불가능할 것으로 판단된다.



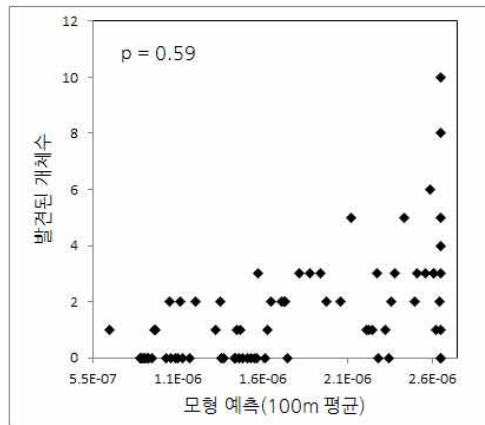
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 12 전문가 설문 선호도에 의한 수원시 모형 예측과 현장조사 결과 비교. 각각 (a)는 지점 예측치, (b)는 반경 25m 예측치 평균, (c)는 반경 50m 예측치 평균, (d)는 반경 100m 예측치 평균과 현장조사 결과 비교.

III. 성남시 평형모형 적용

수원시를 대상으로 구현된 모형의 외삽(extrapolation) 적용성을 평가하고, 또한 모형의 유일한 매개변수 집합인 선호도의 타당성을 간접적으로 평가하기 위해, 구현된 모형을 성남시에 적용했다. 모형의 입력 자료와 검증에 위한 조류 현장조사 자료는 성남시(2004) 토지피복지도와 조류 현장 조사 결과를 활용했다.

1. 대상지와 자료 수집

1) 대상지 개요

성남시는 광교산을 중심으로 수원시의 북동쪽에 위치한다(그림 13). 전체 면적은 141.7km²이며 2012년 기준 인구는 978,095명이다. 산림과 농경지가 전체 면적의 53% 이상을 차지하고 있으며, 도시 중심을 흐르는 탄천을 중심으로 여러 지천들이 동서 방향으로 흐르고 있다.

2) 토지피복

선호도를 결정하는 토지피복 자료로는 성남시(2004)의 토지피복지도를 활용했다. 이 자료는 2003년 기준으로, 1:1,000과 1:5,000 축척의 수치지형도를 이용해서 초안을 작성하고, 성남시 전지역을 현장조사한 후, 수정편집해서 작성됐다(성남시, 2004). 수원시의 경우와 마찬가지로, 성남시 토지피복지도는 성남시 행정 경계까지만 작성되었고, 경계 외부의 자료는 환경부 토지피복도를 활용했다(그림 14).

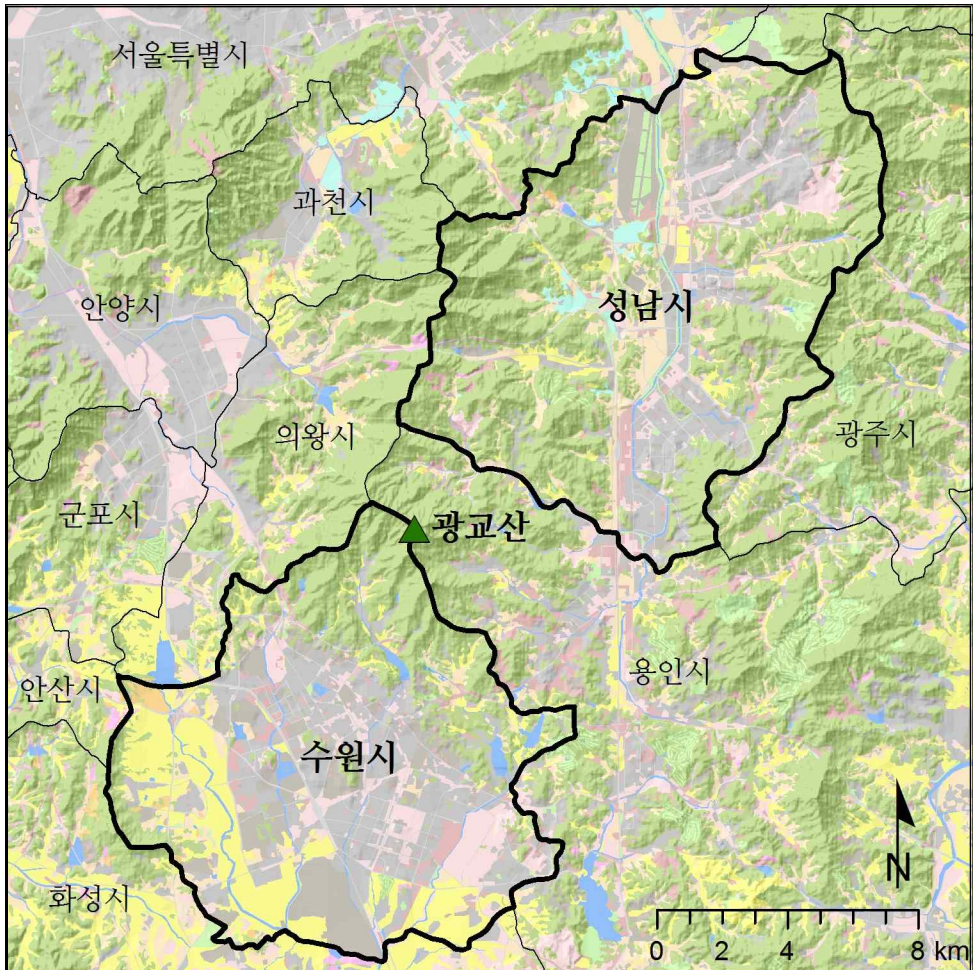


그림 13 성남시 대상지 개요.

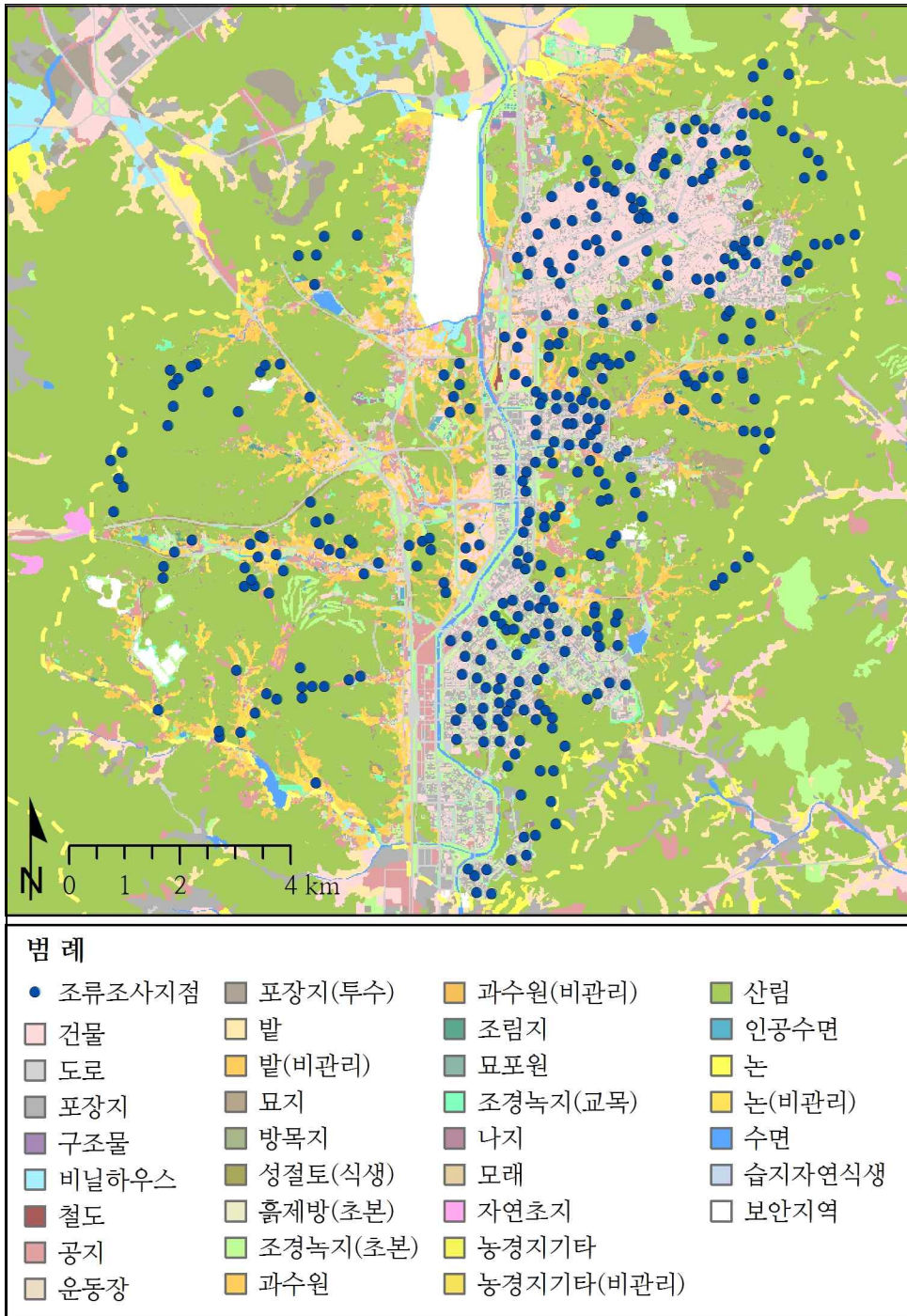


그림 14 성남시와 인접지역 토지피복과 유효 조사 지점(357개).

3) 조류 현장 조사

조류 현장조사 자료는 성남시(2004) 조사 결과를 활용했다. 조사는 2003년 3월 초부터 6월 중순까지 번식기에 진행됐고, 이 기간 동안 3차례로 시기를 나누고, 한 지점에 대해서 3번 반복 조사를 수행했다. 조사 시간은 해 뜨는 시각부터 약 3시간 반 정도 진행됐다. 조사는 약 400여 지점에서 시도됐으나, 조사 결과의 품질 검토 후 367개 지점만이 보고됐다(성남시, 2004). 이 연구에서는 보고된 367개 지점을 모두 활용했다(그림 14).

조사 방법은 수원시와 비슷한 정점 조사 방법이 활용됐는데, 각 지점에서 체류시간은 수원시와 같은 5분이지만, 조사 반경은 50m로 한정된 점은 수원시 조사와 다른 점이다. 이 경우도 조사 지점의 주요 환경요소를 야장에 함께 기입해서, 조사 위치와 주변 환경과 맥락을 조사 후에도 확인할 수 있었다(성남시, 2004). 지점당 3번 반복 조사에 대한 종별 발견 개체수의 평균값이 보고됐으며, 이 연구에서도 이 평균값을 이용했다.

조사 결과 총 11목 33과 74종이 발견됐고, 그 중 천연기념물인 원앙(*Aix galericulata*), 붉은배새매(*Accipiter soloensis*), 황조롱이(*Falco tinnunculus*)와, 환경부 지정 멸종위기 야생생물인 흰목물떼새(*Charadrius placidus*)가 포함되어 있다. 발견된 전체 종들 중에서 박새류는 박새(*Parus major*), 쇠박새(*Parus palustris*), 진박새(*Parus ater*), 곤줄박이(*Parus varius*)이며 보고된 총 발견 빈도는 287.4번이었다(성남시, 2004). 표 5는 이 연구의 대상종들의 목록과 기록된 출현 개체수이다.

표 5 성남시 출현종 중 이 연구의 대상종들인 박새류 출현 개체수.

목	과	종	학명	개체수
참새목	박새과	쇠박새	<i>Parus palustris</i>	130.02
		박새	<i>Parus major</i>	132.07
		진박새	<i>Parus ater</i>	10.28
		곤줄박이	<i>Parus varius</i>	15.03
계				287.40

2. 모형의 적용

1) 모형의 적용

모형의 논리와 구체적인 선호도 값들은 수원시에서 구현된 그대로 성남시에 적용했다. 또한 연구자가 결정한 선호도와 전문가 집단 설문을 통한 선호도를 모두 적용했다.

2) 평형상태 예측결과와 현장조사 결과의 비교

2003년 성남시 토지피복에 따른 평형상태를 계산하고, 그 결과를 그림 15에서 현장 조사 지점에서 발견된 개체수와 함께 표현했다. 수원시 결과와 비교할 때, 전반적으로는 활동량 예측값이 높은 지역이 많으며, 예측값의 최대값은 낮고 최소값은 높게 나타났다. 이는 각 격자에서의 활동량을 전체 대상지의 활동량에 대한 비율로 표현하도록 했기 때문에, 상대적으로 활동량이 많은 공간이 늘어난 결과이다. 수원시의 경우와 같이, 성남시 모형 결과도 토지이용 양상을 잘 보이고 있으며, 현장조사 결과와도 시각적인 유사성을 확인할 수 있었다(그림 15).

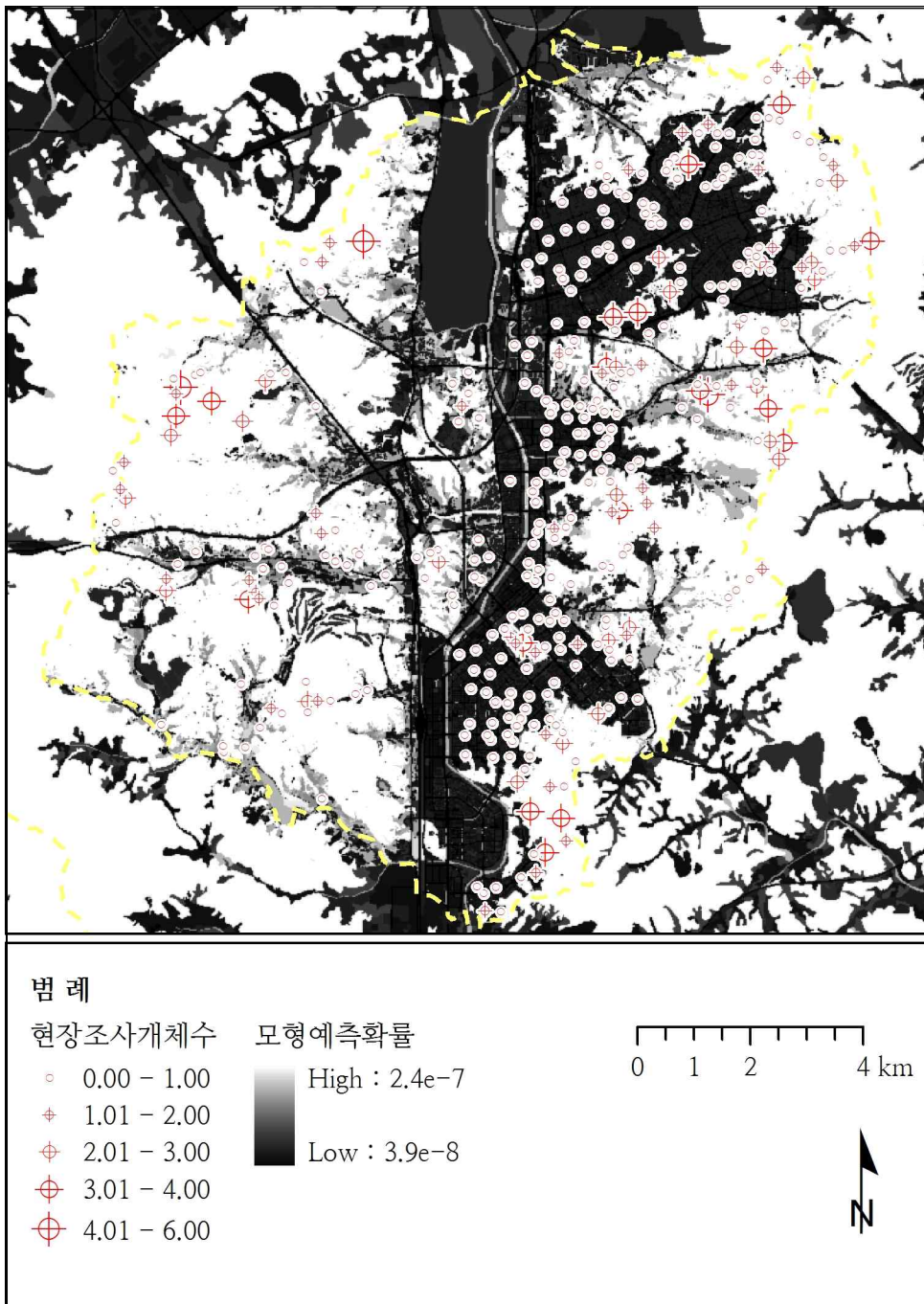
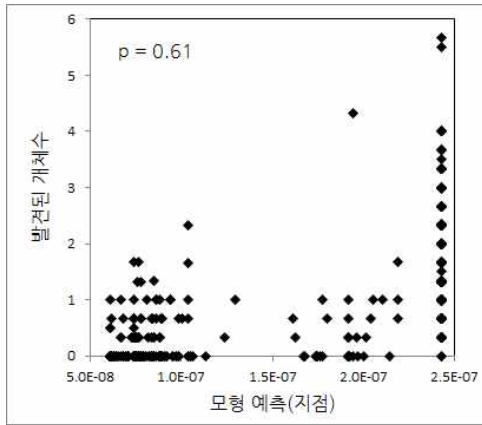


그림 15 성남시 평형상태 예측 결과와 현장조사 결과 비교.

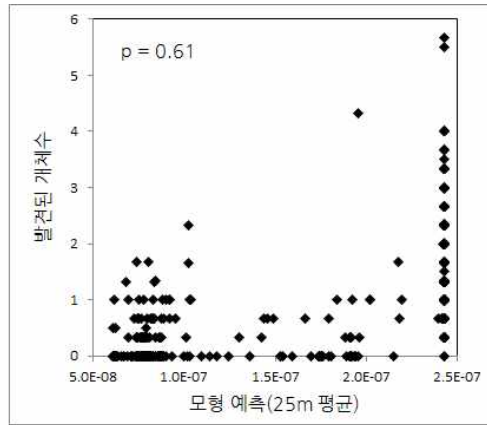
성남시 평형모형 예측 결과도 현장조사 결과와 비교했다. 성남시 조사 설계의 경우, 수원시와 다르게 지점 중심에서 반경 50m 이내에 출현하는 개체들만 관찰하도록 되어있다(성남시, 2004). 그러나 비교는 수원시의 경우와 같이 현장조사 지점에서의 예측치와, 반경 25m 이내의 예측치 평균값, 반경 50m 이내의 예측치 평균값, 그리고 반경 100m이내의 예측치 평균값을 각각 현장조사 결과와 비교했다(그림 16). 비교 결과, 모든 경우에 0.60이상의 양의 상관을 보였다. 수원시와 비교할 때, 반경 100m 평균과의 비교(그림 16의 d)를 제외한 모든 경우에 수원시의 경우보다 높은 상관을 보였다.

또한 평균 반경이 커질수록 상관이 높아지는 것이 아니라, 평균 반경 50m의 경우에 최대 상관을 보이고 있는데(그림 16의 c), 이는 수원시의 결과(그림 11)와는 다른 모습이다. 수원시의 경우 반경 100m까지 출현하는 개체들을 조사했고, 성남시 조사 설계는 반경 50m 이내의 출현 개체들만 기록하도록 되어있다는 점을 고려할 때, 이는 흥미로운 결과이다. 그러나 이러한 결과가 현장 조사 자료에 대한 모형의 정확한 반응인지 확인하기 위해서는 더 많은 사례 연구가 있어야 할 것이다.

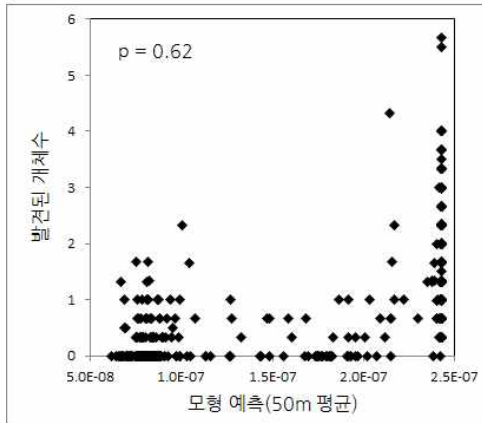
더 적은 자료(수원시)를 통해 구현된 모형이 더 많은 자료(성남시)에서도 비슷하거나 향상된 설명력을 보였다는 점과, 두 도시에서 조사 설계상 조사 반경의 차이도 적절히 예측되었다는 점을 고려할 때, 모형의 외삽 적용 가능성은 긍정적이라고 판단된다. 그러나 이런 판단은 지리적으로나 환경적으로 어느 정도 유사성이 있는 단지 두 도시에서의 적용 결과에 따른 것이다. 따라서 모형의 외삽 적용 가능성에 대한 최종적인 판단을 위해서는, 보다 다양한 사례 연구가 필요할 것이다.



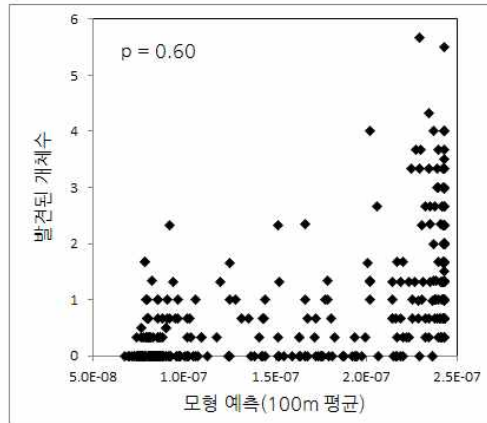
(a)



(b)



(c)



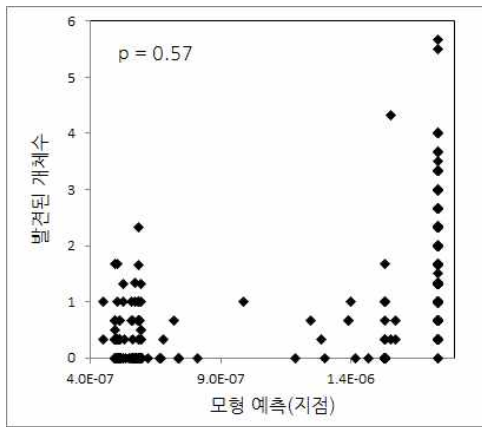
(d)

그림 16 성남시 모형 예측과 현장조사 결과 비교. 각각 (a)는 지점 예측치, (b)는 반경 25m 예측치 평균, (c)는 반경 50m 예측치 평균, (d)는 반경 100m 예측치 평균과 현장조사 결과 비교.

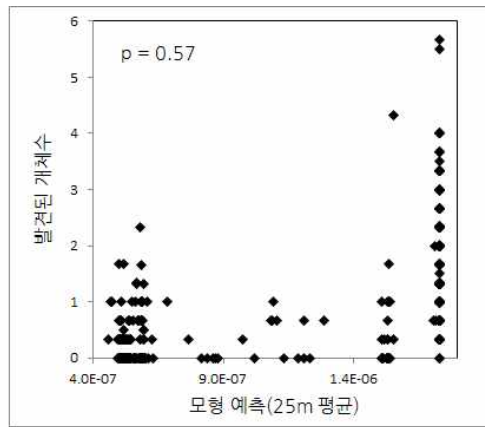
3) 전문가 설문에 의한 선호도와 비교

수원시를 대상으로 적용된, 전문가 설문에 의한 선호도를 성남시에 적용해 평형상태를 계산했다. 전문가 설문은 구체적인 토지피복이나 조 사결과를 참고해서 작성되는 것이 아니고, 기존에 가지고 있던 지식에 기반해서 작성되는 것이므로 사실 수원시 환경에 종속될 이유는 없다. 오히려 설문에 임하는 전문가의 지식이나 경험에 의존할 가능성이 크다. 상식적으로는 특정 지역을 대상으로 집중적으로 매개변수를 추측하는 것 보다는, 전문가 집단이 추측한 선호도가 더 다양한 환경을 고려할 것이라 생각할 수 있다. 따라서 이 연구에서 결정한 선호도가 수원시 자료에 완전히 의존적이라면, 수원시에서는 더 상관이 높은 결과를 만들었지만, 다른 지역에서는 오히려 전문가 설문에 의한 선호도를 이용한 경우가 더 높은 상관을 보일 것이라 추측할 수도 있다.

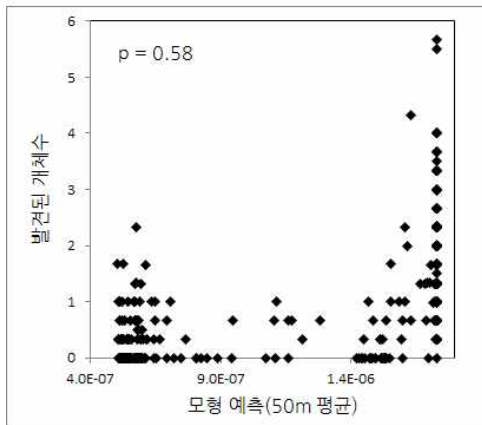
전문가 집단 설문에 의한 선호도를 적용한 모형 예측과 현장조사 결과와의 비교는 그림 17에 제시했다. 그림 17에서 볼 수 있는 것처럼, 피어슨 상관계수는 0.57에서 0.58로 계산됐으며, 이는 이 연구에서 결정한 선호도에 의한 모형의 경우보다 낮은 수치였다. 또한 이 경우에도 아주 약간이나마 50m 반경의 평균값이 가장 큰 상관을 보였다(평균반경 50m의 경우 0.579, 100m의 경우 0.577). 더 많은 사례 연구를 통한 검증이 필요하겠지만, 현재까지는 이 연구에서 결정한 선호도가 전문가 설문에 의해 결정된 선호도보다 두 도시에서의 현장 조사 결과를 다소나마 더 잘 설명하는 것으로 보이며, 실제 현장조사에서의 조사 반경을 잘 반영하고 있는 것으로 보인다.



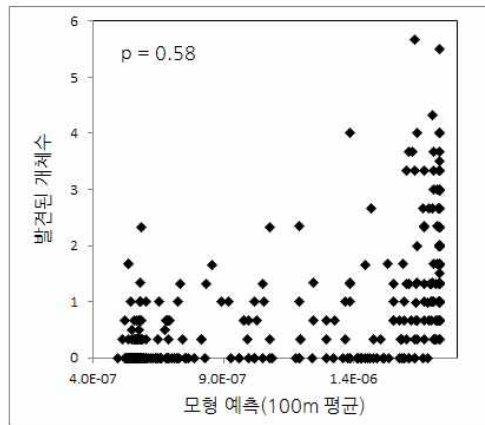
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 17 전문가 설문 선호도에 의한 성남시 모형 예측과 현장조사 결과 비교. 각각 (a)는 지점 예측치, (b)는 반경 25m 예측치 평균, (c)는 반경 50m 예측치 평균, (d)는 반경 100m 예측치 평균과 현장조사 결과 비교.

IV. 도시내 이동 연결망 특성

지금까지 논의를 통해 1. 도시 지역에서 산림성 조류의 번식이동 과정을 설명할 수 있는 2차원 격자 구조의 랜덤워크 모형을 개발하고, 2. 수원시를 대상으로 모형을 구현했으며, 3. 구현된 모형을 다시 성남시에 적용해 모형의 외삽 적용 가능성을 검토했다.

한편, 이 연구에서 개발한 모형의 가장 큰 특징은, 조류의 번식이동을 주변 환경과의 상호작용을 통해서 동역학적이며 확률적으로 다룬다는 점이다. 그 특징을 고려할 때, 이 모형의 주된 활용 분야는 1. 도시와 같은 복잡한 환경에서 조류 개체군의 확산 정도를 예측하거나, 2. 가장 그럴듯한(stochastically plausible) 번식이동 경로를 평가하거나, 또는 이와 같은 예측에 기반하여, 3. 복잡하고 파편화된 환경에서 조류 하위 개체군들 사이의 메타 개체군 연결성 개선 전략을 개발하는 것 등이 될 것이다.

이러한 개별 주제들을 다루기 위해서는 개발된 평형상태 모형을 주제에 맞도록 개선할 필요가 있다. 이 장에서는 수원시를 대상으로 평형상태 모형을 개선하여 비평형 시뮬레이션 모형을 개발하는 과정과, 이를 통해 도시 내부에서 번식이동의 경로 문제를 좀 더 자세하게 다루도록 한다.

1. 조류에 의한 생태계 서비스의 도시내 공급망

조류가 도시 내부에 공급하는 생태계 서비스는 주로 조류의 활동량과 관계가 있다. 그 중에서도 가장 중요한 것은 먹이나 물, 그리고 둥지

자원 등 생존 유지에 필요한 직접적인 자원을 획득하기 위한 활동이다 (Whelan et al., 2008; Wenny et al., 2011). 이 활동은 생존 유지를 위한 이동(maintenance movement) 중에서 욕망적 반응으로 볼 수 있다 (Pettingill, 1985).

번식기 산림성 조류의 활동은 등지를 중심으로 이루어지기 때문에, 활동 경로의 출발점과 도착점은 산림 생태계의 특정 지점이 될 것이다. 등지의 위치는 도시 주변의 큰 산림 또는 도시 내부의 작은 산림이 될 것이며, 중간 경로는 산림 또는 도시 내부가 될 것이다. 이런 가정에 따라 조류 활동 경로를 생각해보면, 실제 공간에서 보일 수 있는 조류의 활동 경로는 크게 네 가지로 구분해 볼 수 있다.

먼저 첫 번째는 배후 산림에서 배후 산림만을 거쳐 출발점으로 돌아가는 경우이다(background forest only path - BF 경로). 두 번째는 배후 산림에서 출발해서 인접한 도시 내부를 이용하고 다시 배후 산림으로 돌아가는 경우이다(background forest and urban path - BU 경로). 세 번째는 도시내 산림에서 같은 도시내 산림만을 거쳐 출발점으로 돌아가는 경우이며(inner forest only path - IF 경로), 네 번째는 도시내 산림에서 인접한 도시 내부를 이용하고 다시 등지로 돌아가는(inner forest and urban path - IU 경로) 경우이다(그림 18).

네 가지 경로 중 도시 내부로 직접 공급되는 생태계 서비스 측면에서 중요한 것은 BU 경로와 IU 경로이다. 도시 토지이용 밀도가 높아지고, 도시의 공간적 크기가 커지면, IU 경로를 통해 공급되는 서비스가 BU 경로를 통해 공급되는 서비스보다 더 중요해질 것이라는 점은 쉽게 알 수 있다. 여기서 주의해야 할 점은 IU 경로상 활동량은 도시 내부의 산림에만 의존하는 것이 아니라, 번식이동이라는 경로를 통해 배후 산림에도 의존한다는 것이다. 도시 내부의 작은 산림과 같이 고립되고 파편

화된 공간은 일반적으로 지속 가능한 서식처로 보기에는 무리가 있다. 이렇게 상대적으로 고립되고 파편화된 공간의 개체군은 메타 개체군 수준의 연결성에 의해 유지될 수 있다(Opdam, 1991). 여기서 연결성은 구체적으로는 번식이동을 의미하게 된다.

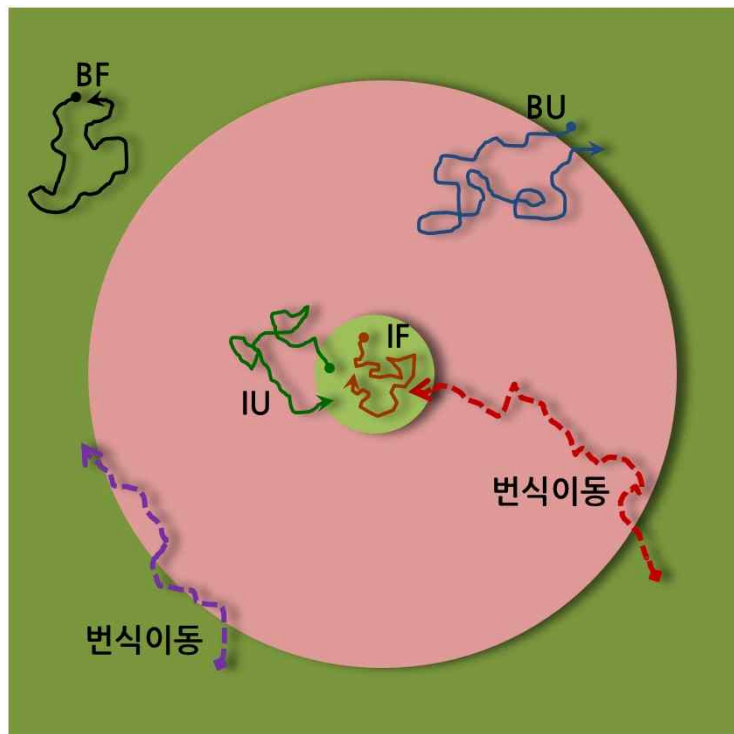


그림 18 개념적으로 구분한 네 가지 조류의 활동 경로들. 생존 유지를 위한 활동(maintenance movement)은 실선으로, 번식이동은 점선으로 구분했다.

실제로 수원시 도시 중심부에 있는 팔달산에서 박새가 관찰되었는데(수원시, 2010), 이 산은 동서 방향으로 약 650m, 남북 방향으로는 약 1.2km의 작은 산이며, 주변은 거의 대부분 매우 높은 밀도의 도시적 토지

이용만이 존재한다. 가장 가까우면서 비교적 큰 배후 산림 생태계로 광교산과 칠보산을 생각할 수 있는데, 광교산까지는 약 2.2km, 칠보산까지는 약 4.5km 이상 떨어져 있다(그림 19). 생존에 필요한 자원이나 근친교배의 문제 등을 고려할 때, 이렇게 작고 고립된 도시내 산림에서, 매우 적은 수의 박새들이 독립적이며 지속적으로 서식할 수 있다고 생각할 수는 없다. 따라서 발견된 박새들은 배후 산림에서 번식이동을 통해 팔달산에 도입된 것으로 이해하는 것이 타당할 것이다.

일반적으로 조류에 의한 도시내 생태계 서비스 공급 측면에서 볼 때, 배후 산림 생태계로부터의 번식이동 경로는 중요한 공급망이지만, 복잡한 도시 토지이용 모자이크에서 어떤 경로가 더 자주 선택될지 알기는 어렵다. 도시 내부에서 확률적으로 그럴듯한 번식이동 경로를 추정하는 것은, 그 자체로 흥미로운 질문이기도 하며, 생태 네트워크나 생태 통로 등의 복원 생태학적 측면에서도 중요한 주제가 될 수 있을 것이다.

2. 모형의 구현

정상적인 상황에서 산림성 조류는 산림과 그 주변부를 더 많이 방문하며, 도시 내부에는 더 적게 방문한다. 그러나 배후 산림 생태계에서 도시 중심에 있는 산림까지 성공적으로 도달한 경우, 어떤 공간을 더 많이 이용했는가는 조건부 확률 문제가 된다. 예를 들어 j 라는 공간을 방문하는 사건을 U_j 라 하고, j 라는 공간을 거쳐 팔달산까지 도착한 사건을 S_j 라 하면, 성공적인 이동에서 j 라는 공간을 이용할 확률은 다음과 같다.

$$P(U_j|S_j) = \frac{P(U_j \cap S_j)}{P(S_j)} \quad (13)$$

여기서 $P(U_j|S_j)$ 를 쉽게 구하기 위해서는, 배후 산림 생태계에서 팔달산까지 번식이동이 성공한 경우에만 특정 공간의 방문 회수를 계산하고, 이를 전체 공간의 방문 회수로 나눠주면 된다. 이 값을 구하기 위해서, 1. 적절한 범위의 대상 공간을 정하고, 2. 많은 수의 개체별 시뮬레이션을 통해 성공적인 번식이동만을 구별하고, 3. 성공적인 번식이동에서 각 공간별 방문 회수를 적절하게 계산할 필요가 있다.

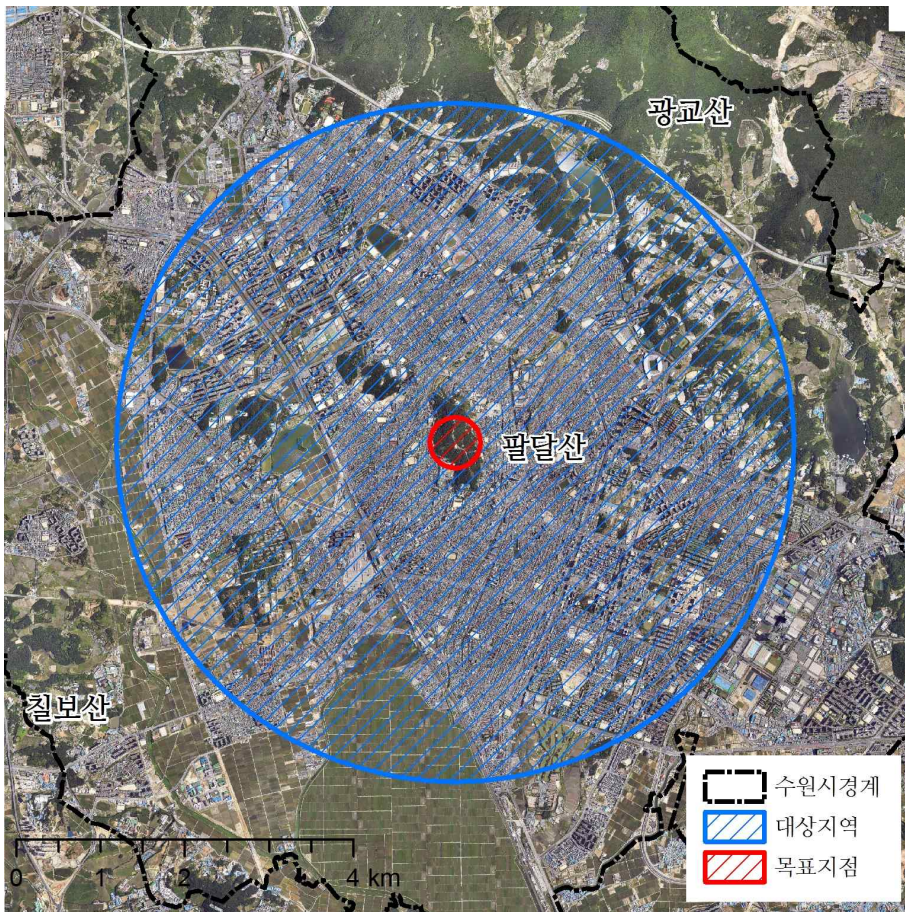


그림 19 경로 분석 시뮬레이션을 위한 대상지 설정.

1) 대상지역 설정

수원시 도시 주변 산림에서 팔달산까지 성공적인 번식이동 경로를 추적하기 위해서는 도시 내부와 외곽을 구분할 필요가 있다. 그러나 실제로 도시 내부와 외곽을 명확하게 구분하기는 어렵다. 그에 비해 팔달산의 위치와 경계는 비교적 쉽게 파악할 수 있다.

따라서 이 연구에서는 팔달산 중심부에서 도시적 토지이용(건물, 포장지, 도로 등)이 밀집된 반경 4km 내부를 대상으로 정하고, 그 내부에서 번식이동을 모의했다(그림 19). 목표 지점인 팔달산 중심에서 동일한 거리 내의 영역을 대상으로 정함으로써, 번식이동 성공률에 있어 방향에 따른 거리의 편차는 없어지게 된다. 동일한 이유로, 목표 지역은 팔달산 중심부에서 반경 300m(동서 방향의 길이)까지 지역으로 설정했다.

2) 조류의 이동

조류는 대상지 경계선 위의 임의의 지점에서 개체별로 출발해서 확률적으로 이동하며, 대상지 밖으로 나가는 경우를 없애기 위해서 경계에서 밖으로 이동할 확률은 모두 0으로 처리했다. 경계선의 각 지점에서 출발하는 조류의 개체수는 평형상태에서 활동량에 비례하도록 했다. 즉, 많은 조류가 활동할 것으로 보이는 산림에서는 더 많은 수의 개체들이 출발하는 반면, 도로나 포장지 등에서는 더 적은 수의 개체들이 출발하게 된다.

조류의 이동 방법은 이미 개발된 평형상태 모형의 것을 그대로 따른다. 즉, 주변 토지피복에 따른 선호도의 비율에 따라 확률적으로 이동하며, 시간당 이동 거리는 1 격자 단위(20m)이다. 대상지 내에서는 현재 위치 주변의 환경에 따라 확률적으로 움직이지만, 목표 지점에 도달하면

멈추도록 했다(absorbing random walk). 이런 효과를 재미있게 “호텔 캘리포니아 효과”라고 부르기도 한다(Newman, 2005).

3) 유한 크기 효과(Finite size effect)

제한된 공간에서 흡착되는 랜덤워크(absorbing random walk)를 하게 되므로, 목표 지역 주변에는 항상 비평형 상태가 유지되는 반면, 확률적 이동을 하는 개체들은 일정한 영역 밖으로 달아날 수 없게 되므로, 항상 목표지점에 흡착되게 된다. 결국 어느 정도의 시간 내에 도착하는 경우는 정상적인 랜덤워크 결과로써 해석할 수 있지만, 그 이상의 시간이 지난 후에 도착하는 경우는 유한 크기 효과에 따라 어쩔 수 없이 팔달산으로 흡착된 것으로 해석해야 한다.

많은 수의 새들이 동시에 반경 4km 밖에서 출발하는 경우를 생각해 보자. 새들은 반경 4km 영역 내에서만 확률적으로 움직이며, 중심에 있는 목표지점에 도착한 경우 멈춘다. 이 경우 일정한 시간 동안($t < \tau$)은 목표지점을 제외한 모든 곳에 확률적으로 적절하게 분산될 것을 기대할 수 있다. 이 시간 동안에 목표지점에 도착한 개체들은 정상적인 확률 과정의 결과로 생각할 수 있다. 그러나 어느 정도의 시간이 지난 후($t \geq \tau$)에는, 목표지점에 흡착되는 개체들의 수는 남아있는 개체수와 목표지점의 면적에 비례하게 될 것이다. 특정 시도에서 목표지점의 면적이 일정하다면, 남아있는 개체수에만 의존하게 될 것이며, 이것은 잘 알려진 지수 함수적 붕괴(exponential decay) 형태를 따를 것이다.

$$\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t), \quad N(t) = e^{\lambda t}, \quad t \geq \tau \quad (14)$$

성공적인 변식이동에서 확률적으로 그럴듯한 경로를 평가하기 위해서는 τ 를 알고, 그 시간 이후에 목표지점에 도착하는 경우를 제거할 필요가 있다. 실제로 τ 시점 이후에 도달하는 개체들의 비율은 지수 함수적으로 감소할 것이므로, 이 값에 로그를 취한 값은 시간에 따라 선형적으로 감소하게 될 것이다.

유한 크기 효과가 발생하는 시점 τ 를 알아내기 위해서, 개별 개체들의 경로 선택 시뮬레이션 이전에 별도의 시뮬레이션을 실시했다. 처음에 모든 새들은 대상지의 경계선에서 출발하며, 경계지점에서 초기 새들의 분포는 평형상태 예측 결과에 따라 배분했다. 매 시간 모형의 논리에 따라 흡착되는 랜덤워크를 하며, 각 시간별로 목표지점에 흡착되는 비율을 구했다.

4) 격자별 이동 기여도와 순 이동량

유한 크기 효과가 발생하는 시간을 통해 성공적인 변식이동을 구분한 후에, 대상지 각 공간별 이동 기여도와 순 이동량을 계산했다. 도시 외곽에서 출발해서 도시 중심부의 팔달산까지 성공적으로 변식이동하는 과정에서, 어떤 경로 또는 어떤 공간을 얼마나 이용했는지 비교하기 위한 가장 쉬운 방법은 각 지점을 몇 번이나 통과했는지 그 수를 세어보는 것이다. 예를 들어 모든 공간에서 통과 회수의 합계가 백만 번이고, 특정 공간의 통과 회수가 천 번이면, 그 공간의 기여도는 0.1%가 되는 것이다. 그러나 랜덤워크에서 이렇게 단순하게 기여도를 계산하기에는 다소 까다로운 문제가 있다.

서로 다른 두 가지 경로를 생각해보자. 현재 대상지 설정이 모든 방향에서 대칭적인 원형이므로, 물리적 거리가 거의 같은 경로 두 가지를 선택했다고 가정하자. 첫 번째 경로는 수없이 많은 전진과 후진을 반복

한 후에 목표 지점에 도달한 반면, 두 번째 경로는 계속 전진만 해서 목표 지점에 도달했다고 가정해보자. 이 경우 첫 번째 경로에 존재하는 지점들은 두 번째 경로에 포함되는 지점들에 비해서 훨씬 더 많은 통과 회수를 가지게 된다. 그러나 명백히 첫 번째 경로가 더 그럴듯하다고 생각할 수는 없다. 오히려 더 쉽게 도착한 두 번째 경로가 더 그럴듯하다고 생각할 수 있을 것이다.

따라서 확률적으로 그럴듯한 경로를 평가하기 위한, 특정 공간의 기여도에 대한 어떤 측도(measure) Γ 는 두 가지 목표를 만족시켜야 할 것이다. 첫 번째는 동일한 개체의 반복되는 방문은 무시하고, 서로 다른 개체들이 더 많이 통과할수록 큰 값을 가져야 하며, 두 번째는 더 짧은 소요시간 또는 짧은 물리적 거리를 가질수록 큰 값을 가져야 한다.

$$\Gamma_j \sim \sum_i^N \frac{b_i}{l(P_i) \cdot t(P_i)} \quad (15)$$

여기서 Γ_j 는 j 격자의 기여도에 대한 측도이고, b_i 는 개체 i 가 격자 j 를 방문했을 경우 1, 그렇지 않은 경우에는 0이며, $l(P_i)$ 와 $t(P_i)$ 는 개체 i 의 경로 P_i 의 물리적 길이와 도달 소요 시간이다. b_i 에서 동일한 개체가 같은 지점을 반복적으로 방문하는 경우를 제외하고 있으며, 이 연구에서 시간당 이동 거리는 0 또는 1 격자 단위로 제한되므로, 사실상 $l(P_i)$ 와 $t(P_i)$ 는 거의 같은 값이 된다. 따라서 중복되는 $t(P_i)$ 는 제거하고 총 시도 회수 N 으로 정규화해주면, j 격자의 기여도 Γ_j 는 다음과 같다.

$$\Gamma_j = \frac{1}{N} \sum_i^N \frac{b_i}{l(P_i)}, \quad \Gamma = \sum_j \Gamma_j = 1 \quad (16)$$

즉, 더 많은 새들이 지나간 공간일수록, 그리고 더 쉽게 목표지점에 도착한 경로들에 포함된 공간일수록 기여도 Γ_j 값이 커지며, 전체 공간의 기여도 합 Γ 는 1이 된다.

비슷한 방법으로 이동량을 벡터로 표현할 수 있다. 어떤 격자 j 에서 동→서 방향의 순 이동량(net movement)을 벡터의 첫 번째 성분으로 취하고, 남↑북 방향의 순 이동량을 벡터의 두 번째 성분으로 취하면, 이 격자에서 순 이동량을 일반적인 2차원 직교좌표의 벡터 형식으로 표현할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned}
 v_{\rightarrow} &= \frac{1}{N} \sum_i^N \frac{b_{i_{\rightarrow}}}{l(P_i)}, & v_{\leftarrow} &= \frac{1}{N} \sum_i^N \frac{b_{i_{\leftarrow}}}{l(P_i)}, & v_x &= v_{\rightarrow} - v_{\leftarrow} \\
 v_{\uparrow} &= \frac{1}{N} \sum_i^N \frac{b_{i_{\uparrow}}}{l(P_i)}, & v_{\downarrow} &= \frac{1}{N} \sum_i^N \frac{b_{i_{\downarrow}}}{l(P_i)}, & v_y &= v_{\uparrow} - v_{\downarrow} \\
 \vec{v} &= (v_x, v_y)
 \end{aligned} \tag{17}$$

격자별 이동 기여도와 순 이동량을 계산하기 위해서, 개체별 랜덤워크 시뮬레이션을 실시했다. 시뮬레이션 과정과 이동 기여도와 순 이동량 계산 과정은 다음과 같다.

1. 대상지 경계 지점들 중 하나의 출발점을 선택한다. 특정 지점의 선택 확률은 평형상태 활동도 예측 결과에 따른다.
2. 유한 크기 효과가 발생하는 시간까지 모형의 논리에 따른 랜덤워크를 한다. 각 개체가 방문한 곳은 방문 회수와는 상관없이 1 값을 가지고, 그렇지 않은 곳은 모두 0이다.
3. 이 때, 어느 격자에서 어느 격자로 이동했는지도 기록해둔다. 이

동량도 반복 회수와는 상관없이 이동이 있으면 1, 그렇지 않으면 0의 값을 가지도록 한다.

4. 유한 크기 효과 시점 이내에 목표지점에 도달하면 성공으로 간주한다. 이 때, 모든 격자들의 값을 1 값을 가진 격자들의 총 수로 나눈다. 이것은 물리적 길이로 나뉘주는 효과를 가지게 된다.
5. 이 때, 3에서 기록한 이동량도 함께 나뉘준다.
6. 유한 크기 효과 시점 이내에 도착하지 못한 경우는 실패로 간주하고, 모든 격자의 값을 0으로 바꾼다.
7. 개체별로 1~6의 과정을 반복하면서, 반복되는 과정에서 각 격자들의 기여도와 이동량 값을 누적해간다.
8. 모든 시뮬레이션이 종료된 후에는, 성공한 회수로 모든 격자들의 값을 나눈다.
9. 식 17을 이용해서 격자별 순 이동량을 계산한다.

5) 매개중심성(Betweenness centrality)

격자별 이동량 I_j 와 순 이동량 벡터 \vec{v} 는 특정 공간의 중요성을 비교할 수 있게 한다. 그러나 전체 대상지에서 경로의 집중화 경향 (centrality)을 보다 쉽게 파악하기 위해서는, 출발점과 목표지점 사이의 전체 공간에서 각 공간의 중요성을 평가할 수 있는 지표를 도입할 필요가 있다.

한편, 각 격자를 그 격자의 중심점으로 생각하고, 격자 사이의 이동량을 격자간 연결 강도(weighted link)로 정의한다면, 대상지는 전체적으로 연결된 가중화된 연결망(fully connected and weighted network)으로 볼 수 있게 된다. 연결망 이론에서는 다양한 집중성 척도가 제안되었고,

사회 연결망, 컴퓨터 연결망, 생물학적 연결망, 인용 관계 연결망 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 매개중심성(Betweenness centrality)은 그 중에 하나로써 역시 다양한 변형이 존재하는데, 가장 단순하면서 많이 사용되는 것은 Freeman이 1977년에 제안한 최단 경로에 의한 매개중심성이다(Newman, 2005). 이 연구에서는 격자간 이동량을 연결 강도에 대한 상대적 척도로 가정하고, 그 가중치의 합이 최대화되는 최적 경로에 의한 매개중심성을 계산했으며, 그 과정은 다음과 같다.

1. 대상지 바깥쪽 경계선에 위치한 격자들을 출발지점으로 하여, 각 격자의 가중치를 구한다. 가중치는 평형상태 조류 활동도 예측값을 이용해서 구하며, 구체적으로는 해당 지점에서 활동도 값을 전체 출발지점들의 활동도 값의 합으로 나눈 값이다.
2. 한 출발지점에서 중심부의 목표 지역까지, 이동량의 역수가 최소가 되는 경로를 찾는다. 이동량은 기여도 계산 과정에서 구한 값을 이용한다.
3. 이 때, 이 경로에 포함된 모든 격자는 해당 출발점에 주어진 가중치를 누적한다.
4. 모든 출발점들에 대해서 2~3 과정을 반복한다.

이렇게 하면, 각 격자는 더 많은 최적 경로에 포함될수록, 그리고 평형상태에서 조류 활동도 값이 큰 지점에서 출발한 경우에 더 높은 매개중심성 값을 가지게 된다.

3. 모형 결과

1) 유한 크기 효과

유한 크기 효과를 제거하기 위해서, 유한 크기 효과가 발생하는 시점을 추정했다. 식 14에서 볼 수 있듯이, 유한 크기 효과가 발생하는 시점 τ 이후에는, 시간별 목표지점 도달률이 지수 함수 형태로 감소하게 된다. 따라서 이를 로그 축척으로 표현하면, 선형적 감소가 시작되는 시점을 찾을 수 있다. 그림 20에서 볼 수 있듯이, 이 계에서는 약 40,000 시간 단위 이후부터 선형적으로 감소하는 현상을 볼 수 있었다.

일반적으로 단순 랜덤워크는 경우 확산 방정식으로 기본해로 구할 수 있으며, 이 경우 특정 시간 t 이후의 전형적인 이동 거리인 변위의 제곱 평균 제곱근(root mean squared displacement)은 시간의 제곱근 \sqrt{t} 에 비례한다(Codling et al., 2008). 여기서 다루고 있는 계는 반경 4km의 원형 지역이며, 한 단위 시간당 최대 이동 거리는 20m이다. 따라서 출발 지점에서 목표지점까지 격자 단위 직선거리는 약 200 격자 정도가 된다. 또한 유한 크기 효과가 나타나는 40,000 시간의 제곱근은 200이므로, 유한 크기 효과가 나타나는 시점은 동일한 시간 동안의 단순 랜덤워크의 전형적인 이동 거리와 거의 같다고 할 수 있다.

이질적인 토지피복들이 복잡하게 배치되어 있는 도시 내부에서, 토지 피복에 따른 선호도의 비율에 따라 확률적 이동을 한 결과가 단순 랜덤워크와 비슷한 특성을 보였다는 점은 특이하다고 할 수 있다. 이 현상은 지역적으로는(locally) 특정 방향으로 편향된 랜덤워크를 하지만, 서로 다른 편향성을 가진 지역적 공간들이 복잡하게 배치되면서, 결국 서로 상쇄 효과를 가짐으로써 나타난 것으로 판단된다. 이 후의 모든 과정에서는 여기에서 확인된 40,000 시간 단위를 변식이동의 성공 기준으로 활용했다.

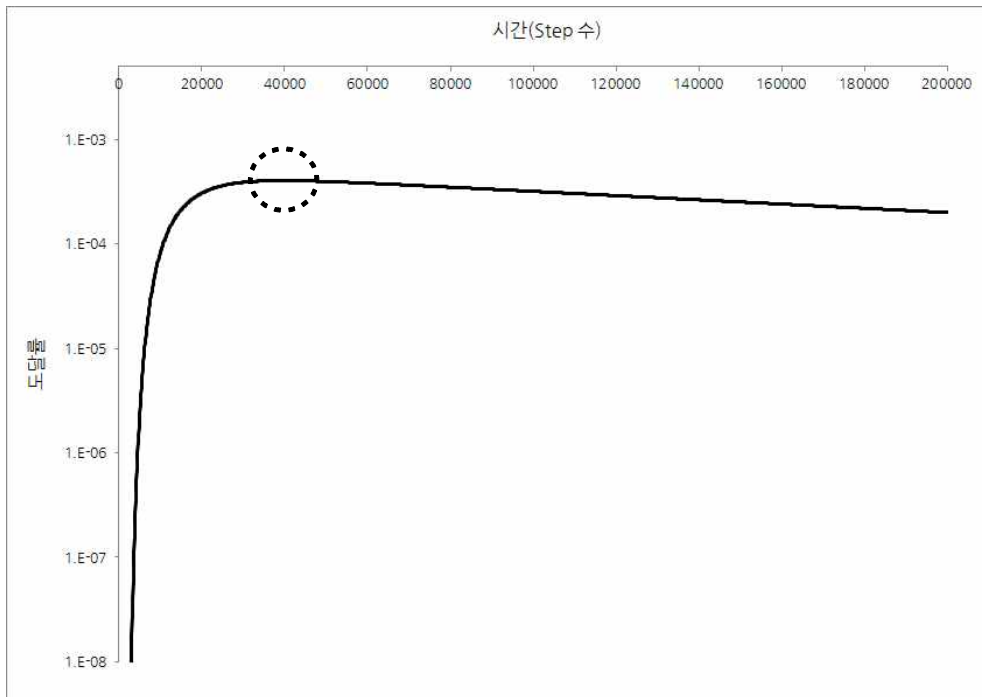
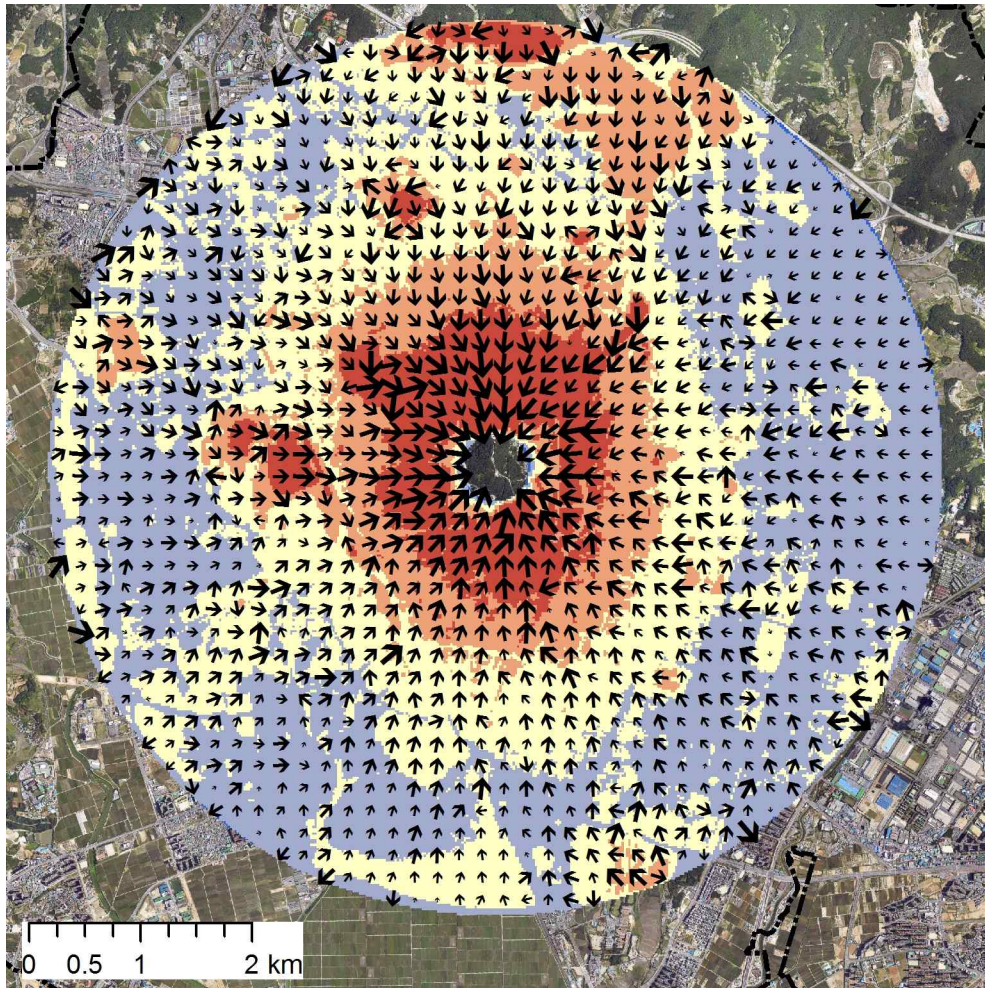


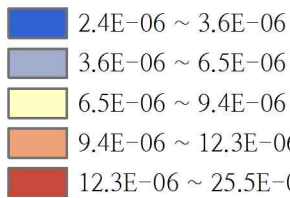
그림 20 시간별 목표지점 도달률. 세로축(도달률)은 로그 축척이며, 대략 40,000 시간을 전후해서 선형적으로 감소하는 현상이 나타난다.

2) 공간 기여도와 순 이동량

공간 기여도와 순 이동량을 구하기 위해서 개체별 시뮬레이션을 실시했다. 총 시뮬레이션 회수는 천만번이었으며 번식이동에 성공한 경우는 984,512번으로, 성공률은 약 9.8%였다. 전체 대상지역은 모두 126,211 개의 격자 공간으로 나뉘지는데, 경로 기여도의 평균값은 $7.9 \times 10^{-6}\%$ 이고, 표준편차는 $2.9 \times 10^{-6}\%$ 였다. 그림 21은 기여도 계산 결과를 표준편차 단위로 구분하고 순 이동량 벡터와 함께 표현한 지도이다. 성공한 번식이동에 있어서 각 격자별 기여도의 공간적 분포를 살펴보면 몇 가지 특징을 파악할 수 있다.



공간 기여도



순 이동량 벡터

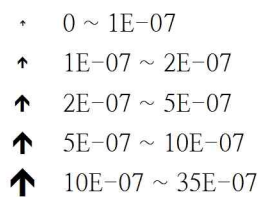


그림 21 성공한 번식이동에서 공간 기여도와 순 이동량 벡터.

우선 첫 번째로 목표지점인 중심부의 팔달산 주변으로 가까이 갈수록 기여도 값이 높아지는 경향을 볼 수 있다. 이것은 많은 경로 선택 중에서 팔달산까지 번식이동에 성공한 경로들만 선택했으므로, 모든 경로들이 팔달산을 향하는 경향성이 누적되어 나타난 결과로 해석할 수 있다. 따라서 서로 다른 거리의 두 지점을 직접적으로 비교하기는 어렵고, 중심점에서 비슷한 거리에 있는 경우에만 직접 비교가 가능하게 된다.

두 번째로, 팔달산 인접 지역은 비슷한 거리에 있는 지역들은 크게 다르지 않은 기여도를 보이지만, 어느 정도 멀어지면서는 주변보다 기여도가 큰 영역을 볼 수 있다. 이들은 모두 도시 내부에 존재하는 작은 녹지들로, 대개의 경우 공원이다. 세 번째로는 하천의 기여도가 주변에 비해 그리 높게 나타나질 않는다는 점이다. 팔달산 주변 하천으로는 북쪽 광고산에서 팔달산 동쪽의 도시 내부를 관통하는 수원천이 있는데, 기여도 측면에서 거의 하천의 형태를 찾아볼 수 없다. 이것은 수원시 하천의 경우 전반적으로 규모가 작고, 특히 도시 내부로 들어오면서 일부 복개되거나 도로 밑으로 흐르는 구간이 많아지면서 경로로 선택되는 확률이 낮아진 것으로 판단된다.

그림 21과 22에서 순 이동량 벡터는 화살표 형식으로 표현되고 있는데, 대체로 경로 기여도와 비슷한 경향을 보이고 있다. 다소 특이한 점은 경로 기여도가 높은 도시 녹지의 내부에서도, 목표지점인 팔달산을 향한 면의 경계 부분에서 순 이동량이 커진다는 것이다(그림 22). 이 결과로 판단해볼 때, 성공한 번식이동 경로들만을 대상으로 했다는 점을 고려하면, 도시 내부에 있는 녹지들은 주변의 새들을 모아 팔달산으로 보내는 펌프와 같은 역할(pumping effect)을 했다고 생각할 수 있다.

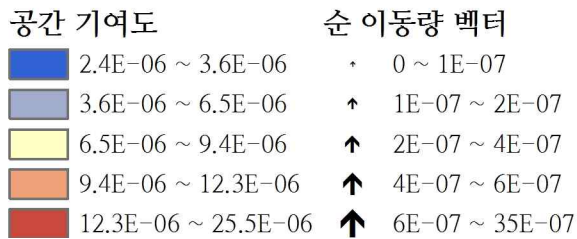
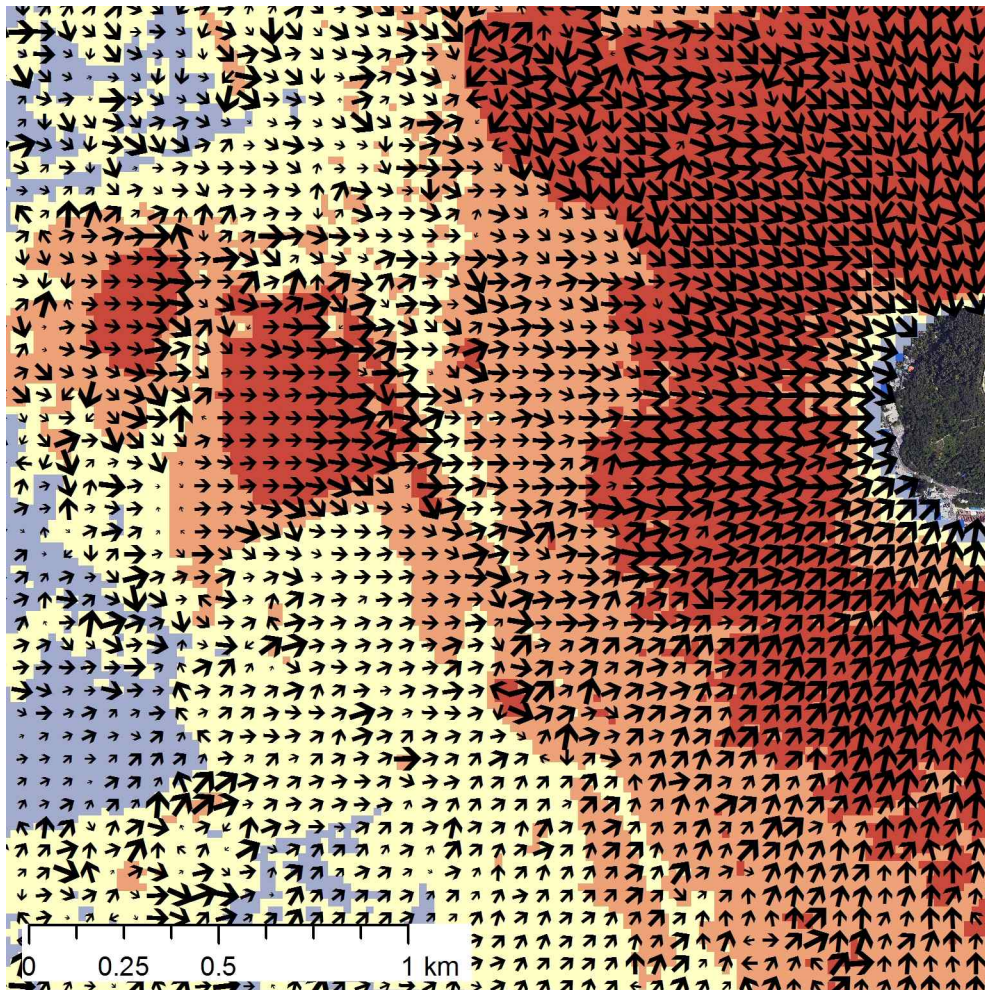
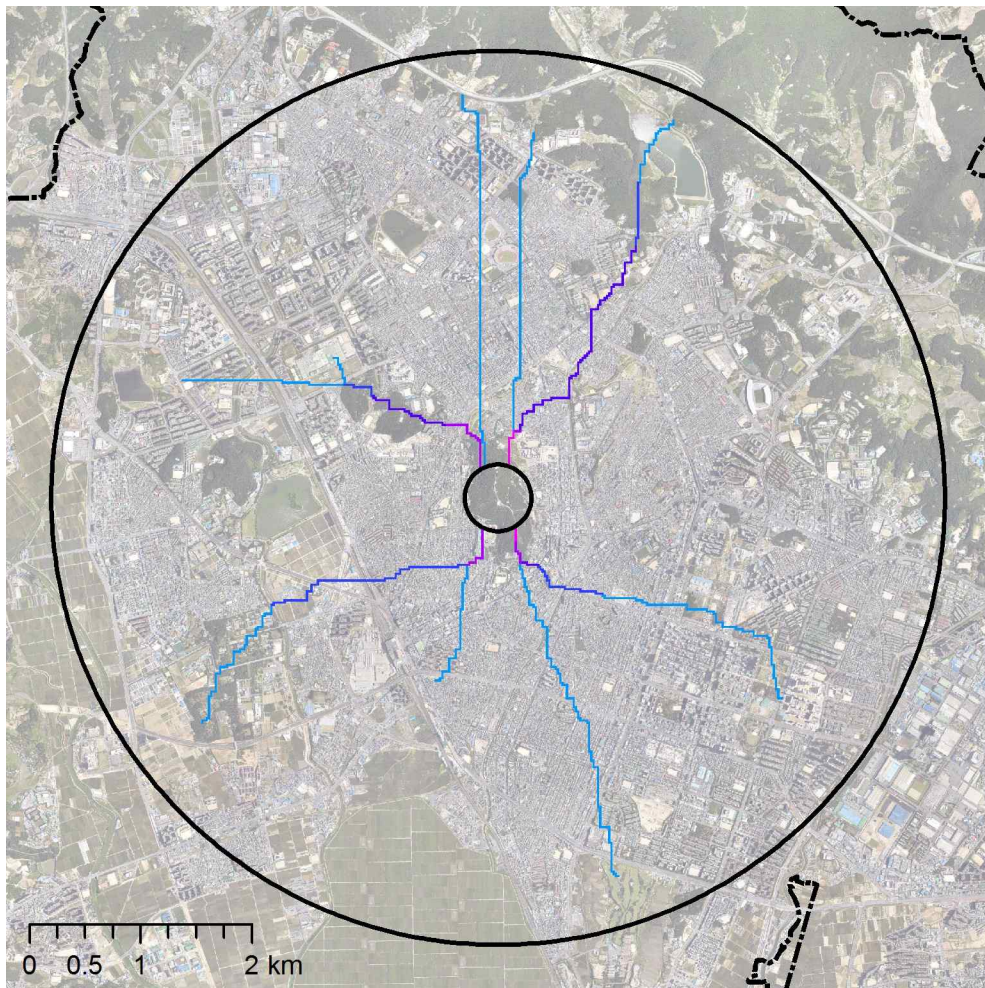


그림 22 공간 기여도와 순 이동량 벡터 부분 확대.

이 결과들은 두 가지 시사점을 준다. 첫 번째는 산림성 조류의 도시 내부로의 번식이동 연결성을 향상시키기 위해서는 도시 내부의 산림이 중요하며, 산림의 면적은 클수록 좋고, 연속적으로 분포할수록 좋으며, 목표지점 방향으로 돌출돼서 목표지점까지 거리가 짧을수록 좋다는 점이다. 두 번째는 수원시 시물레이션의 결과에도 불구하고 하천의 중요성을 과소평가할 수는 없다는 점이다. 수원시의 경우 하천의 규모가 작고 팔달산에서 수원천으로 연결되는 지천이 존재하지 않아서 하천의 기여도가 낮았다. 그러나 수원천의 규모가 충분히 크고, 팔달산에 흐르는 지천이 존재해서 수원천과 만난다면, 첫 번째 시사점의 원리로 미루어볼 때, 하천의 경로 기여도는 지금보다 높았을 것으로 판단된다.

3) 매개중심성(Betweenness centrality)

모든 흐름이 최적 경로만 따른다는 가정 때문에, 최적 경로에 의한 매개중심성은 이 경로보다 조금이라도 먼 경로의 기여도는 무시하는 단점이 있는 반면, 집중화 경향을 단순하게 파악할 수 있는 장점을 가진다. 그림 23는 대상지에서 최적 경로에 의한 매개중심성을 구한 결과이다. 대부분의 연결점들은 0 또는 매우 낮은 값을 가지고, 소수만이 극단적으로 높은 값을 가지는 최적 경로에 의한 매개중심성의 특성상, 평균이나 표준편차의 의미가 크지 않으므로, 0 근방의 값을 제외하고 동일한 구간으로 값을 나누어 표시했다.



Betweenness centrality

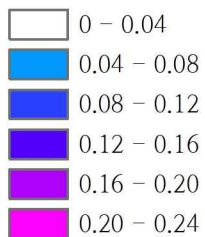


그림 23 최적 경로에 의한 매개중심성(betweenness centrality). 북쪽의 광고 산까지 높은 매개중심성이 연결되고 있다.

그림 23에서, 높은 매개중심성을 가지는 연결점들은 몇 개의 경로를 형성하면서 도시 외곽에서 팔달산 방향으로 모이는 경향을 보이고 있다. 출발지점과 그 인접 지역에서는 매우 낮은 매개중심성을 가지고, 어느 정도 도시 내부로 들어오면서 급격하게 값이 커지는 지점들이 연속된다. 이 중에 북쪽과 북동쪽에서 출발한 경로를 제외하면, 다른 경로들은 모두 팔달산과 도시 내부의 작은 산림이나 공원을 연결하는 수준에서 그치고 있다. 그러나 북동쪽 경로는 팔달산에서 가장 가까우면서 큰 배후 산림인 광교산과 만나고 있다. 다소 비현실적으로 직선형인 북쪽 경로도 광교산과 만나고 있는데, 이 경우는 북동쪽 경로까지 돌아가지 못한 개체들의 이동이 반영된 것으로 판단된다. 따라서 북쪽 경로와 북동쪽 경로는 모두 광교산과의 연결성을 보여주는 경로들이라고 할 수 있을 것이다. 공간별 경로 기여도 분포와 최적 경로에 의한 매개중심성 값의 분포를 함께 고려할 때, 팔달산의 산림성 조류들은 광교산과의 연결성이 클 것으로 판단되며(그림 23), 광교산과 팔달산 북동쪽 사이에 존재하는 공원과 작은 녹지들이 그럴듯한 경로를 구성하는 요소들일 것으로 예상된다(그림 23과 24).

4) 연결성 취약 지역

팔달산과 광교산 사이의 공원과 작은 녹지들이 확률적으로 가장 그럴듯한 경로라고 한다면, 그 경로 중에서 연결성이 좋지 못한 지점의 위치는 자연스러운 질문일 것이다. 역으로 표현한다면, 최소한의 투자를 통해서 팔달산과 광교산 사이의 산림성 조류의 번식이동 연결성을 효과적으로 보강할 수 있는 위치라고도 할 수 있을 것이다.

정교하게 그 위치를 정하기 위해서는, 이 연구에서 제시한 번식이동 측면에서의 생태적 요인 외에도 다양한 사회 경제적 요소들이 고려되어

야 할 것이다. 그러나 다양한 요소들이 함께 고려되기 전에, 산림성 조류의 번식이동 측면에서 생태적 요인들만을 고려한 후보 지역을 제시하는 것 또한 충분히 의미 있는 과정이 될 것이다.

그림 24는 팔달산과 광교산 사이에서, 앞의 과정에서 얻은 최적 경로에 의한 매개중심성과 격자별 경로 기여도를 중첩한 결과이다. 이 두 가지 지표에 의해서 전체 공간을 나눠보면 크게 네 가지 다른 공간으로 구분할 수 있을 것이다. 첫 번째는 경로 기여도도 낮고 매개중심성도 낮은 경우이고, 두 번째는 두 값이 모두 높은 경우이다. 세 번째는 매개중심성은 낮은 값을 가지지만 경로 기여도는 높은 경우이다. 네 번째가 가장 중요한데, 매개중심성은 높은 반면 경로 기여도가 상대적으로 낮은 경우이다.

네 번째가 중요한 이유는 배후 산림 생태계와 목표지점과의 공간적인 관계 속에서 이 지점들이 중요한 위치에 있지만, 실제로는 연결성이 좋지 않아서 번식이동에 크게 기여하지 못하고 있기 때문이다. 그림 24의 붉은색 상자로 표시한 연결성 취약 지점들이 그러한 예인데, 광교산에서 팔달산으로 향하는 경로에서, 다음 녹지까지 사이에 도로 등으로 단절이 일어난 경우이다. 최소한의 면적의 토지이용을 바꿔서 전체적인 연결성을 개선하고자 한다면, 이런 유형의 지역들이 가장 우선적으로 검토되어야 할 것이다.

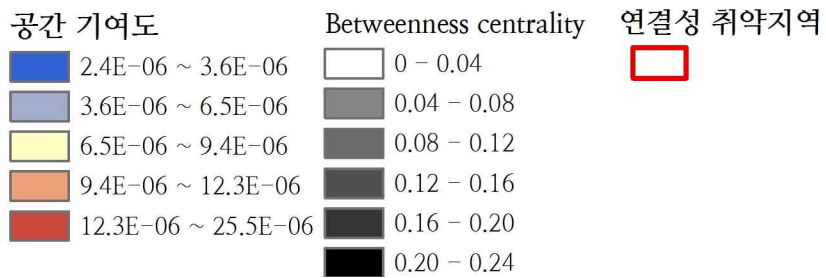
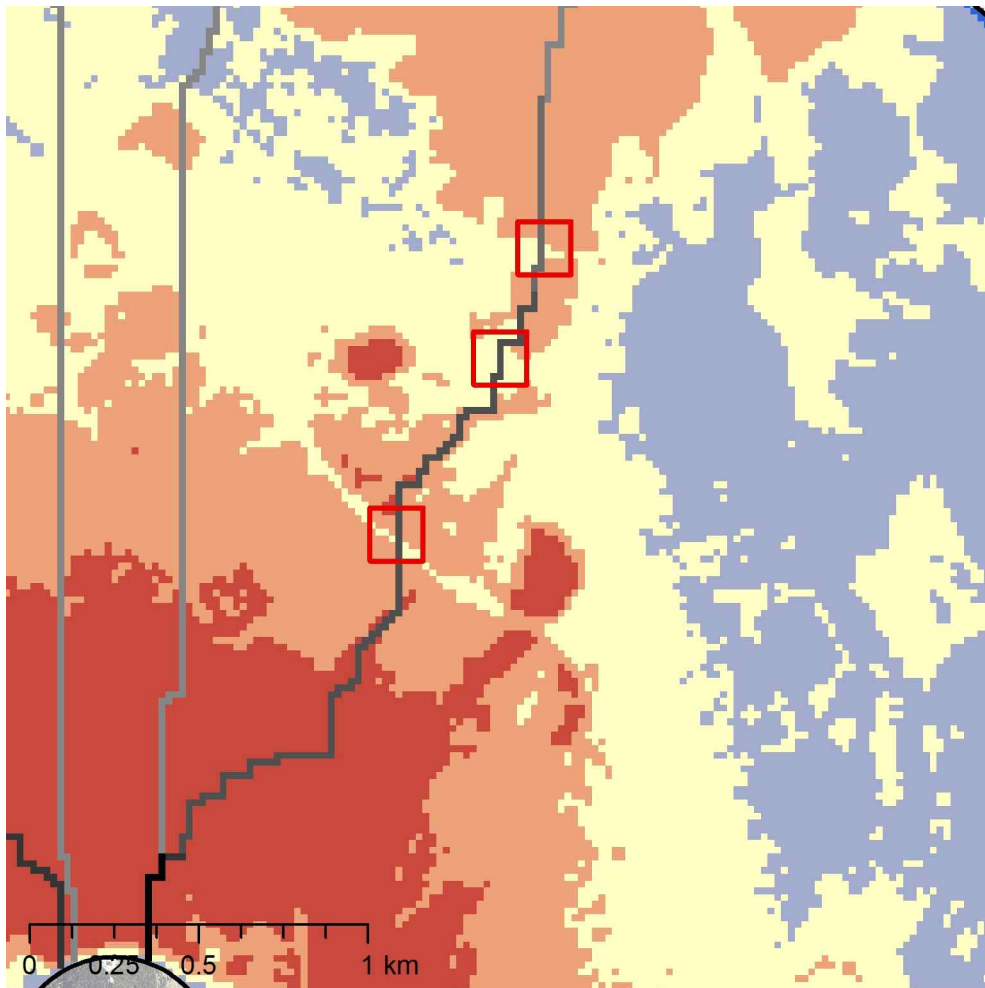


그림 24 매개중심성(betweenness centrality)과 공간별 경로 기여도의 중첩.

V. 토론과 결론

1. 평형상태 모형 개발

이 연구에서는 박새류 개체군의 번식이동을 예측하기 위해, 2차원 격자기반의 평형상태 랜덤워크 모형의 논리를 개발하고, 수원시를 대상으로 구체적인 모형을 개발했다. 모형은 4가지 정의에 의해서 구성되며, 조류의 이동 방향을 결정하는 선호도와 이동속도는 4가지 가정에 의해서 결정했다. 수원시 구현결과, 조사지점 중심으로 반경 100m 이내 예측치의 평균과 조사결과와의 피어슨 상관계수는 0.61로 비교적 높은 양의 상관관계를 확인할 수 있었다(그림 11). 수원시(2010)의 연구 결과와 비교할 때에도, 모형에 요구되는 입력자료와 매개변수가 토지피복도와 그에 따른 선호도뿐이었으나, 모형의 예측치가 현장조사 결과와 높은 양의 상관을 보이는 등, 모형의 효율은 높다고 평가할 수 있었다.

모형의 외삽(extrapolation) 적용성을 평가하기 위해, 구현된 모형을 성남시에도 적용했다. 성남시의 경우 활용 가능한 자료가 2003년에 조사된 것이므로, 모형은 2003년도 토지피복 환경에 적용했다. 현장조사 자료와 비교 결과, 피어슨 상관계수는 0.62로 수원시와 비슷한 정도였으나, 수원시와는 다르게 반경 50m 이내의 평균 예측값에서 가장 높은 상관을 보였다. 이는 50m 이내 출현 개체들을 조사하도록 되어 있는 성남시 조사 설계와 부합되는 흥미로운 결과였다. 앞으로 더 많은 사례 연구가 필요하겠지만, 모형이 범용적으로 적용될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

평형상태에 대한 예측결과, 수원시 조류의 활동도의 확률분포는 정규분포나 그와 유사한 분포가 아니었다(그림 10과 표 4)는 점은 흥미로우

면서도 몇 가지 시사점을 가진다. 우선 이 경향이 일반적인 도시의 경향이라면, 도시지역에서 조류상을 적절하게 평가하기 위해서는 현장조사 지점을 보다 적절히 선택할 필요가 있다는 점이다. 측정이론에 따라 높은 빈도를 보이는 부분과 그 주변을 보다 세밀하게 조사할 필요가 있다. 조사지점 선택에 있어서 무작위 추출(random sampling) 방법이나 계통 추출(systematic sampling) 방법, 그리고 그와 유사한 방법들은 적절하지 못할 가능성이 크다.

두 번째 시사점은 공간의 용도를 결정하는 계획가들에게 중요할 수 있다. 조류의 분포가 균일한 분포나 중형 분포를 가진 지역에 대한 개발 사업은, 조류 분포에 대한 교란 측면에서 입지의 중요성이 없거나 매우 약하다고 할 수 있다. 대체지역을 찾을 가능성이 충분하며, 결국 면적의 문제로 수렴될 것을 예상할 수 있다. 그러나 이 연구의 결과와 같은 분포를 가지는 지역에서는, 개발지의 면적보다는 그 위치가 주변 생태계와 어떤 관계를 가지는지가 더 중요할 수 있다. 비교적 적은 면적이라도, 활동도가 밀집된 곳에서의 개발 사업은 조류의 이동 측면에서 대체지역을 찾을 가능성이 낮기 때문이다.

2. 선호도 문제

모형의 예측 결과가 현장조사 결과와 상당한 양의 상관관계를 보인 것은, 모형의 핵심 가정 중 하나인 선호도를 정확하게 결정하는 문제에 대해서는 보다 집중적인 연구가 필요할 것이다. 더 많은 조사 자료들을 통해서 통계적으로 접근할 필요도 있으며, 개체의 활동에 따른 자원 획득 또는 실패라는 측면에서 생태학적이며 생리학적인 접근도 필요할 것이다.

이 연구에서는 선호도를 가정할 수 있는 몇 가지 필요조건들에 대해서 기존 연구들을 살펴봤으며, 그 중 상당수는 최적 수렵 이론(Optimal Foraging Theory)에 대한 연구들이었다. 이 연구는 동물의 최적화 경향성을 가정하는(MacArthur et al., 1966; Pyke et al., 1977) 최적 수렵 이론과 확률적 기댓값을 탐색하는 랜덤 워크 이론을 연계한 모형을 개발했으며, 이를 복잡한 실제 도시 공간에 적용했다는 의미를 가진다. 이 연구의 시도가 보다 의미 있는 성과들로 연결되기 위해서는, 선호도의 원인과 발현에 대한 이론적이고 실증적인 연구가 더 많이 시도되어야 할 것이다.

한편, 선호도 결정의 타당성을 간접적으로 검토하기 위해서 전문가 설문을 통해 별도의 선호도 집합을 작성했다. 결정된 선호도를 마찬가지로 수원시와 성남시에 적용한 후, 그 결과를 현장조사 결과와 비교했다. 선호도 그 자체도 전문가 집단 설문을 통해 결정한 것과 연구자가 결정한 것과 유사한 경향을 보였으며, 적용 결과도 유사한 결과를 보였다.

연구자의 선호도는 선행 연구들과 수원시 자료를 이용해서 결정한 반면, 전문가 선호도는 수원시 자료와 상관없이, 개인의 경험과 지식에 의존해서 작성된 선호도들의 평균이다. 따라서 연구자의 선호도는 수원시 자료에 더 맞는 반면, 전문가 선호도는 두 도시에서 비슷한 결과를 얻을 것이라 기대할 수 있다. 그러나 적용 결과는 모두 유사했으며, 이것은 다른 지역에서의 적용 가능성에 대한 간접적인 증거라고 판단된다.

3. 자료 관측의 문제

모형이 예측하는 경향에서 벗어나는 지점들도 상당수 존재하는데, 이들의 경향은 주로 높은 예측값에 비해 낮은 관측값을 가지는 지점들이었다(그림 11과 12, 그림 16과 17). 이런 지점들은 모형 예측값과 현장 조

사 결과를 비교하는 도표에서 대체로 오른쪽 아래에 위치하는 지점들이다. 표 6은 수원시와 성남시의 전체 조사지점들 중, 모형 예측 경향에서 가장 벗어나는 약 10% 지점들에 대해서, 토지피복 유형별로 개체수 평균과 선호도와 모형 예측 결과를 비교한 것이다.

표 6을 보면, 전체 56개 지점들 중 약 2/3에 해당되는 35개의 지점이 산림에 존재하는데, 이들 지점들에서 발견된 개체수는 지점당 1마리 정도이다. 연구자와 전문가 집단에서 모두 높은 선호도를 추정한 자연초지와 주연부 농경지들까지 합치면 전체 56개 지점 중 약 90%인 50개 지점에서 기댓값보다 훨씬 적은 개체수가 관찰된 것이다. 이 지점들은 모두 그림 11과 12, 그리고 그림 16과 17에서 오른쪽 아래 부분에 존재하는 지점들이다.

일반적으로 박새류는 산림 내부에 서식하는 내부종(interior species)이거나, 산림 내부와 주연부에 모두 서식하는 일반종(generalist species)으로 알려져 있다(Choi et al., 2006). 모형이 평형상태를 계산했다는 점을 고려한다면, 충분히 포화된 상태에서 산림이나 주연부 경작지에 박새류의 활동이 많을 것으로 예측하는 것은 충분히 타당할 것이다. 따라서 표 6에 있는 지점들이 모형의 예측 경향에서 벗어나는 원인은, 모형의 한계라기보다는 현장 조사 과정이나 확률적 현상의 관측에 존재하는 요동(fluctuation)에서 기인했을 가능성이 더 클 것이다.

예를 들어 실제 특정 지역이 충분히 평형상태에 도달하지 못한 결과, 관측된 조류의 활동이 기댓값에 미치지 못할 수도 있다. 또는 종간 경쟁으로 인해 박새류가 해당 공간을 충분히 차지하지 못한 결과일 수도 있으며, 해당 지점에서의 조사 시기에 조사자와 조류가 조우하지 못한 이유일 수도 있다. 참고로 표 6에 제시된 10% 정도의 지점들을 제외할 경우, 성남시와 수원시 모두 피어슨 상관계수는 0.75를 넘으며, 카이 제

곱 적합도 검정도 유의미한 수준이 된다.

표 6 모형 예측 경향에서 가장 많이 벗어난 상위 10%의 지점들.

토지피복	지점수	개체수	평균	선호도	예측 평균
산림	35		1.2	2.0	2.6E-07
자연초지	1		0.0	2.0	3.5E-07
농경지기타(비관리)	1		0.0	1.9	2.1E-07
밭(비관리)	8		0.0	1.8	1.9E-07
논(비관리)	5		0.0	1.7	1.9E-07
조경녹지(초본)	1		2.3	1.3	1.0E-07
건물	3		1.6	1.2	9.4E-08
포장지	2		1.7	1.1	7.5E-08

조류 개체수, 모형 예측값은 같은 유형에 포함되는 지점들의 평균값.

4. 모형의 한계와 개선 방향

표 6의 조사지점들을 제외시킨다 해도, 모형의 예측과 조사 결과가 유사한 것은 사실이나, 부분적으로는 모형이 잘 설명하지 못하는 지점들 또한 존재한다. 모형의 적합도 검정 결과 유의성을 찾지 못한 것은, 자료 관측의 문제 이외에 모형 논리의 한계도 기여했을 것으로 판단된다. 가장 먼저 생각해볼 수 있는 한계점은, 모형의 논리가 너무 단순하다는 점이다.

현재 이 연구에서 개발한 모형은 인접한 공간들의 비교에 의해서만 확률적 이동이 발생한다. 향후 모형의 논리 개선을 위해서는 최소한 현재 공간의 고유한 효과와 누적 효과가 고려될 필요가 있다. 번식이동은 기본적으로 번식 과정에서의 이동을 다루는데, 불리한 환경에서는 번식

성공률도 낮아지게 된다. 불리한 환경에 진입한 개체들의 번식 성공률이 낮아지는 현상은 그 공간에서 다른 공간으로 이동하는 개체들의 수를 줄이는 효과를 가진다. 따라서 계속해서 불리한 환경 내에서 이동이 이루어질 경우, 낮아진 번식 성공률에 따른 누적효과가 발생하게 된다. 이런 현상은 지수 함수적 감소 형태를 따를 것으로 기대할 수 있다. 향후 이런 효과가 추가적으로 모형에 반영될 필요가 있다.

또 다른 모형의 한계로는, 여러 가지 이동 형태 중에서 번식이동만을 다루고 있다는 문제가 있다. 일반적으로 산림성 조류들은 번식기와 비번식기를 거치며, 두 시기에 다소 다른 이동 양식을 가지는 것으로 알려져 있다. 비번식기의 이동이 다음 둥지 선택 장소에 영향을 줄 것이라는 점은 쉽게 예측할 수 있다. 비번식기 이동을 함께 고려하게 되면, 번식이동 거리를 결정하는 가정 4는 상당부분 수정이 필요할 것이다. 단위 시간당 번식이동 거리는 비번식기 이동량에 따라 확률적으로 늘어날 것이기 때문이다.

실제로 많은 연구에서 동물의 이동 양상이 레비 비행(Lévy flight) 형태를 따른다고 보고되었다(Benhamou, 2007; Buchanan, 2008). 한편, 영국에서 약 85년간 축적된 자료를 정리한 한 연구에서는, 내륙에 서식하는 종들의 경우 번식이동 거리는 대다수가 1km 이내였지만, 적은 확률로는 100km 이상인 경우도 존재했다(Paradis et al., 1998). 다른 연구들에서는 번식이동 거리의 분포가 기하 분포를 따른다는 주장들도 존재하며, 반대로 이런 양상은 관측 지점들의 공간적 밀도가 균일하지 않은데서 발생한 허상일수도 있다는 주장도 있다(Porter et al, 1993). 아무튼 이와 같은 현상은 둥지 위치에 구속되지 않는 비번식기 이동을 고려하지 않으면 설명되기 어려울 것이다.

마지막으로 비평형 모형으로의 확장 문제를 생각할 수 있다. 비평형

모형의 논리 구조는 평형 모형과 동일하므로 어려울 것이 없다. 그러나 비평형 모형을 통해 현재의 상태를 진단하고 미래를 예측하기 위해서는, 현재 모형의 시간 단위를 물리적으로 어떤 의미인지 정의해야 하며, 초기값을 정확하게 알 수 있어야 한다. 이것은 어려운 일이다.

그러나 4장에서 본 것처럼, 특수한 상황에서는 비평형 모형을 적절하게 활용할 수 있을 것이다. 4장에서는 배후 산림 생태계로부터 도시 내부의 작은 산림까지 그럴듯한 번식이동 경로를 평가했으며, 그 과정에서 개체별 번식이동을 시뮬레이션하기 위해서 비평형 모형을 사용했다. 이 경우 초기값은 인위적으로 결정했으며, 중심으로부터 4km 떨어진 원 주상의 지점에 평형상태의 활동도 비율에 따라 배분했다.

모형의 한계들을 적절하게 보완하고, 합리적이고 적절한 가정을 활용한다면, 이 연구에서 개발된 모형을 보다 다양한 상황에서도 활용할 수 있을 것이다. 다음은 예상되는 몇 가지 주요 활용 분야들이다.

1. 복잡한 환경에서 조류 개체군의 확산 정도 예측
2. 복잡한 환경에서 조류 번식이동의 주요 경로 평가
3. 파편화된 환경에서 공간적으로 분리된 조류 하위 개체군간 연결성 증대를 위한 전략 수립

5. 번식이동 경로 평가와 생태계 서비스

조류에 의한 생태계 서비스는 대부분 조절과 부양 서비스이며, 이는 조류의 이동 경로와 활동량에 비례한다(Whelen et al., 2008; Wenny et al., 2011). 도시의 경우, 면적이 클수록 도시 내부에 존재하는 산림에서 공급되는 생태계 서비스가 중요해지며, 도시 내부 산림에 존재하는 새들

은 대개 배후 산림 생태계로부터 번식이동한 경우로 생각할 수 있다. 번식이동은 도시 내부로 공급되는 조류에 의한 생태계 서비스의 주요 공급 경로인 것이다.

이 연구에서는 수원시 팔달산에서 관측된 박새류를 대상으로 상정하고, 시뮬레이션을 통해 이들이 광교산에서 출발해서 팔달산 북동쪽 녹지들을 따라 번식이동했을 가능성이 크다는 가설을 제시했다. 실증적인 확인을 위해서는 잘 설계된 관측이 더 필요하며, 원격 측정(telemetry) 도구를 이용해 시간별 위치 변화를 일정기간 추적할 수 있다면 가장 확실한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 그러나 현재까지는, 특히 대한민국에서는 조류에 대한 원격 측정 연구가 매우 부족한 현실이다. 기술의 발전에 따라 실험 비용은 계속 감소하고 있으므로, 향후 산림성 조류의 도시내 이동에 대한 원격 측정 도구를 이용한 관측이 진행되기를 기대할 수 있을 것이다.

조류는 개체수도 많고, 비교적 도시에서도 많이 활동하는 동물군이다. 그러나 조류의 생태계 서비스에 대한 연구는 현재까지 매우 부족한 현실이다(Whelen et al., 2008; Wenny et al., 2011). 이 연구의 후속 연구로써, 산림성 조류의 활동량에 따른 생태계 서비스 평가 연구가 적절하게 이루어진다면, 조류에 의해 도시에 공급되는 생태계 서비스를 양적으로뿐만 아니라 공간적으로도 적절하게 평가할 수 있게 될 것이다. 이 연구에서 개발된 모형의 한계를 개선하고, 원격 측정 도구를 이용한 관측 자료가 보완된다면, 조류에 의한 생태계 서비스의 공급망에 대해서도 더 잘 이해할 수 있게 될 것이다. 생태계 서비스 공급망 구조적 특성에 따른 세부적인 변화 양상이나 교란에 대한 생태계 서비스의 안정성과 같은 연구들은 매우 흥미로운 후속 주제들이 될 수 있을 것이다.

■ 참고문헌

- 강우형, 2001. 확률과정의 물리학. 한국문화사, 서울.
- 국립산림과학원, 2005. 도시숲의 생태적 가치. 서울.
- 성남시, 2004. 비오톱 등급 평가 및 도시생태현황도(Biotop map) GIS구축
학술연구. 경기도 성남.
- 수원시, 2010. 자연환경 조사 및 도시생태현황 GIS 구축을 위한 연구. 경기
도 수원.
- 채희영, 김창희, 백운기, 오홍식, 2000. 조류 생태학. 아카데미 서적, 서울.
- Andren, H., 1992. Corvid density and nest predation in relation to forest
fragmentation: a landscape perspective. Ecology 73, 794-804.
- Balmford, A., Bruner, A., Cooper, P., Costanza, R., Faber, S., Green, R.E.,
Jenkins, M., Jefferiss, P., Jessamy, V., Madden, J., Munro, K., Myers,
N., Maeem, S., Paavola, J., Rayment, M., Rosendo, S., Roughgarden,
J., Trumper, K., Turner, R.K., 2002. Economic Reasons for Conserving
Wild Nature. Science 297, 950-953.
- Benhamou, S., 2007. How Many Animals Really Do the Walk? Ecology
88(8), 1962-1969.
- Blair, R.B., 1996. Land Use and Avian Species Diversity along an Urban
Gradient. Ecological Applications 6(2), 506-519.
- Blair, R.B., 1999. Birds and Butterflies along an Urban Gradient: Surrogate
Taxa for Assessing Biodiversity? Ecological Applications, 9(1), 164-170.
- Brown, J.S., 1999. Vigilance, patch use and habitat selection: Foraging
under predation risk. Evolutionary Ecology Research 1: 49-71.
- Brown, C.T., Liebovitch, L.S., Glendon, R., 2007. Lévy Flights in Dobe
Ju/'hoansi Foraging Patterns. Human Ecology 35, 129-138.
- Bryan, S.M., Bryant, D.M., 1999. Heating nest-boxes reveals an energetic

- constraint on incubation behaviour in great tits, *Parus major*.
 Proceedings of the Royal Society 266: 157-262.
- Buchanan, M., 2008. The Mathematical Mirror to Animal Nature. *Nature* 453, 714-716.
- Charnov, E.L., 1976. Optimal Foraging, the Marginal Value Theorem. *Theoretical Population Biology* 9: 129-136.
- Choi, C.Y., Nam, H.Y., Hur, W.H., Lee, W.S., Kim, H.J., Hwang, G.Y., 2006. Edgy Preference of Forest-dwelling Birds in the Temperate Deciduous Forest. *Journal of Ecology and Field Biology* 29(3): 191-203.
- Codling, E.A., Plank, M.J., Benhamou, S., 2008. Review: Random walk models in biology. *Journal of the Royal Society Interface* 5, 813-834.
- Costanza, R., d'Arge, R., Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., Belt, M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253-260.
- Cushman, S.A., McKelvey, K.S., Noon, B.R., McGarigal, K., 2010. Use of abundance of one species as a surrogate for abundance of others. *Conservation Biology* 24, 830–840.
- Farber, S.C., Costanza, R., Wilson, M.A., 2002. Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services. *Ecological Economics* 41, 375-392.
- Feller, W., 1968. *An Introduction to Probability Theory and Its Application* Vol 1. John Wiley & Sons, New York.
- Gregorio, A.D., Jansen, L.J.M., 2005. *Land Cover Classification System: Classification concepts and user manual*, FAO, Rome.
- Hardidian, J., Sauer, J., Swarth, C., Handly, P., Droege, S., Williams, C., Huff, J., Didden, G., 1997. A citywide breeding bird survey for Washington D.C. *Urban Ecosystems*, 1, 87-102.

- Hostetler, M., 2001. The importance of multi-scale analyses in avian habitat selection studies in urban environments. In: Marzluff, J. M., Bowman R., Donnelly R. (Eds.), *Avian ecology and conservation in an urbanizing world*. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, pp. 139-154.
- Jørgensen, S.E., 1992. *Integration of Ecosystem Theories: A Pattern*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Klafter, J., Schlesinger, M.F., Zumofen, G., 2006. Beyond Brownian Motion. *Physics Today* 49, 33-39.
- Krebs, J.R., Ryan, J.C. Charnov, E.L., 1974. Hunting by Expectation or Optimal Foraging? A Study of Patch Use by Chickadees. *Animal Behaviour* 22: 953-964.
- Larsen, F.W., Bladt, J., Rahbek, C., 2009. Indicator taxa revisited: Useful for conservation planning? *Diversity and Distributions* 15, 70 – 79.
- Lee, J., Kwak, I., Lee, E.K., Kim, K.A., 2007. Classification of breeding bird communities along an urbanization gradient using an unsupervised artificial neural network. *Ecological Modelling* 203: 62-71.
- Li, P., Martin, T.E., 1991. Nest-Site Selection and Nesting Success of Cavity-Nesting Birds in High Elevation Forest Drainages. *The Auk* 108: 405-418.
- MacArthur, R.H., Pianka, E.R., 1966. On Optimal Use of a Patchy Environment. *The American Naturalist* 100: 603-609.
- Marzluff, J.M., Restani, M., 1999. The effects of forest fragmentation on avian nest predation, In: Rochelle, J.A., Lehmann L.A., Wisniewski, J., (Eds.), *Forest fragmentation, Wildlife and management implications*. Brill, Leiden, pp.155-169.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2003. *Ecosystems and Human Well-being*, Island Press, Washington, D.C., USA.

- Mörtberg, U.M., 2001. Resident bird species in urban forest remnants; landscape and habitat perspectives. *Landscape Ecology* 16, 193-203.
- Newman, M.E.J., 2005. A measure of betweenness centrality based on random walks. *Social Networks* 27-1: 39-54.
- Opdam, P., 1991. Metapopulation theory and habitat fragmentation: a review of holarctic breeding bird studies. *Landscape Ecology* 5, 93-106.
- Paradis, E., Baillie, S.R., Sutherland, W.J., Gregory, R.D., 1998, Patterns of natal and breeding dispersal in birds. *Journal of Animal Ecology* 67, 518-536.
- Pettingill, O.S., Jr., 1985. *Ornithology in Laboratory and Field*, Academic Press Inc, Oriando.
- Porter, J.H., Dooley, J.L., Jr., 1993. Animal Dispersal Patterns: A Reassessment of Simple Mathematical Models. *Ecology* 74(8), 2436-2443.
- Pyke, G.H., 1977. Optimal Foraging: Movement Patterns of Bumblebees Between Inflorescences. *Theoretical Population Biology* 13: 72-98.
- Pyke, G.H., Pulliam, H.R., Charnov, E.L., 1977. Optimal Foraging: a Selective Review of Theory and Tests. *The Quarterly Review of Biology* 52:137-154.
- Richard, D., 1999. *Essentials of Stochastic Process*, Springer, New York.
- Ripple, W.J., Beschta, R.L., 2012. Large predators limit herbivore densities in northern forest ecosystems. *European Journal of Wildlife Research*, <http://dx.doi.org/10.1007/s10344-012-0623-5>.
- Roberge, J.M., Mikusinski, G., Svensson, S., 2008. The White-backed Woodpecker: Umbrella species for forest conservation planning? *Biodiversity and Conservation* 17, 2479 – 2494.
- Rhee, I., Shin, M., Hong, S., Lee, K., Kim., S.J., Chong, S., 2011. On the Lévy-Walk Nature of Human Mobility. *Journal of IEEE/ACM*

- Transactions on Networking 19-3, 630-643.
- Sasvári, L., 1979. Observational Learning in Great, Blue and Marsh Tits. *Animal Behaviour* 27: 767-771.
- Slagsvold, T., 1986. Nest site settlement by the Pied Flycatcher: does the female choose her mate for the quality of his house or himself? *Ornis Scandinavica* 17: 210-220.
- Smith, J.N.M., Dawkins, R., 1971. The Hunting Behaviour of Individual Great Tits in Relation to Spatial Variations in Their Food Density. *Animal Behaviour* 19: 695-706.
- Smith, J.N.M., Sweatman, H.P.A., 1974. Food-Searching Behavior of Titmice in Patch Environments. *Ecology* 55: 1216-1232.
- Steele, B.B., 1993. Selection of Foraging and Nesting Sites by Black-Throated Blue Warblers: Their Relative Influence on Habitat Choice. *The Condor* 95: 568-579.
- Tallis, H., Goldman, R., Uhl, M., Brosi, B., 2009. Integrating conservation and development in the field: implementing ecosystem service projects. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7(1), 12-20.
- Viswanathan, G.M., Afanasyev, V., Buldyrev, S.V., Murphy, E.J., Prince, P.A., Stanley, H.E., 1996. Lévy flight search patterns of wandering albatrosses. *Nature* 381, 413-415.
- Wenny, D.G., Devault, T.L., Johnson, M.D., Kelly, D., Sekercioglu, G.H., Tomback, D.F., Whelan, C.J., 2011. The need to quantify ecosystem services provided by birds. *An International Journal of Ornithology* 128(1), 1-14.
- Whelan, C.J., Wenny, D.G., Marquis, R.J., 2008. Ecosystem services provided by birds. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1134, 25 – 60.

수원시 홈페이지 <http://www.suwon.ne.kr/>

한반도 생물자원 포털 <http://www.nibr.go.kr/species/home/main.jsp>

환경부 EGIS <http://egis.me.go.kr>

Abstract

Network Characteristics of Forest Birds' Dispersal Movement in an Urban Area

-Development and Application of the Random Walk Model-

EngKyoung Lee

Department of Environmental Planning

Graduate School of Environmental Studies

Seoul National University

Natural ecosystems provide humans with various benefits including the provision of food and water, the purification of pollutants, and the regulation of climate change. Many ecologists around the world have recently been exploring these benefits, called ecosystem services, from various approaches. In urban planning, in order to generate better outcomes from limited resources, we need to understand and make the best of quantity of resources at hand and the supply networks through which they become available.

Birds, in particular, provide various functional services in urban areas. The amount of service provided by birds relates to the activities they engage in and the structure of the supply network that exists along the movement paths that birds take. Although research on habitat suitability is relatively abundant, studies on birds' movement paths and the ecosystem services available along them have been relatively limited.

To analyze and predict the activity of birds in a complex urban environment, some means by which the movements of many birds can be simulated dynamically and probabilistically are essential. A random walk model is one way that random movements of many objects can be dealt with in a way that is practical yet scientific and stochastic.

In this regard, I developed a two-dimensional raster-based random walk model so as to predict the probability of the existence and movement of birds in the present study. I also created a useful application of this model for the analysis of the network characteristics of birds' movement in an urban area. As a first step, a new mathematical model to predict distribution of birds' activity in the steady state was newly designed. This model was then implemented in the environment of the city of Suwon in Gyeonggi Province, Korea so as to empirically test the model. The implemented model was also applied to Seongnam, the northeast neighbouring city of Suwon, to test the applicability of the model to another city environment. Last, using an unsteady state version of the model created by modifying the steady state version, I proposed the most plausible path of dispersion movement of titmice observed at Mt. Paldal (located in the center of Suwon), and

identified the weakest sites in terms of connectivity of the path.

Using four definitions and four assumptions, a mathematical model was designed to represent the random walk of birds interpreted as spatially and temporally discrete Markov processes. The subjects for this model and the movement type studied are limited to forest birds, especially titmice, and the dispersal movement respectively. I placed additional restrictions on the model by assumption for simplicity. The distance per step was fixed to one cell (20m×20m). Preference in the birds' selection of movement direction was also introduced based upon the optimal forage theory and some other related studies. The movement direction of birds' is stochastically determined as the preference ratio of neighboring cells at every step and location.

The mathematical model was implemented upon the environment of Suwon. With preferences determined by land cover as input of the model, the activity distribution of birds in steady state was predicted and compared with the rate of occurrence at each 79 points of field survey data recorded in 2009. Although it cannot be assumed that the real activity of birds in the Suwon area had reached completely steady state, the correlation coefficient between model prediction and field data exceeded 60%. In addition, to test possibility of extrapolation to another urban area, the model was applied intact to the adjacent city, Seongnam. In spite of higher quantity of data procured (357 and 3 repeated survey points) in Seongnam, the predictive accuracy of the model was similar to that seen in field survey data collected in Suwon. Based on these results, the viability of the application of this model to other urban ecosystems

was proven.

As a practical application of model, the network characteristics of dispersal movement of the birds in the downtown area of Suwon are analyzed. In the process, a few titmice had been observed at Mt. Paldal located in the center of the city in 2009. Because this mountain is very small and isolated by urban land use on all sides, it would be reasonable to assume that the titmice had come from bigger forests outside of the city. To estimate the most plausible path, I calculated the amount and the direction of the dispersal movement and the betweenness centrality of each cell. As a result of these calculations, I reasoned that the titmice had come from Mt. Gwangyo, located near the northern boundary of Suwon, and dispersed through the fragmented green patches scattered between the two mountains. By overlaying the amount of movement and betweenness centrality spatially, I identified the three weakest sites along the path in terms of connectivity of network, the small area that has high betweenness centrality and a low amount of movements. This approach will prove useful for the selection process of candidate areas to serve as the most effective sites to restore or reinforce the connectivity of the supply network of the bird's ecosystem services.

The major findings of this study can be summarized as follows:

1. Although the structure of the model is relatively simple, it was able to realistically predict the distribution of the titmice's activity at the two testing sites without modification, demonstrating the potential for this model to be applied to other cities along the

forest birds' dispersal movement.

2. The predicted distribution of the birds' activity in the two urban landscapes could not be explained by normal distribution, but showed a few narrow peaks between very low and very high activity. This result could have some implications for the sampling design for birds and land use planning considering the movement paths of birds in urban areas.
3. Mt. Gwangyo near in the northern boundary of Suwon was the most plausible source of the titmice found at Mt. Paldal located in the center of city, and the fragmented green areas scattered between the two mountains presented the most plausible path of dispersal movement.
4. In Suwon, small forests and relatively large parks in the urban area played a larger role in the movement paths of birds than the street trees and urban streams. The small forests appear to have a "pumping effect", in that they gather birds from the surrounding area and send them to Mt. Paldal.
5. Overlaying the betweenness centrality and amount of movement in each cell was an effective method for discovering the weakest sites in terms of connectivity of the birds' movement network. This method can be applied to the selection of potential sites for restoration or improvement of connectivity of the supply network of the birds' ecosystem services.

In the present study, I limited my research on the birds' movements

to dispersal movement, introduced preference assumption, and assumed the moving distance as constant. These restrictions enabled the model to be simple and applicable. For a more realistic prediction and analysis of the more interesting dynamics such as Lévy flight, however, these limitations would need to be removed or modified. The addition of more data describing the birds' movement in a more practical way such as radio-telemetry, GPS tracking and remote sensing would allow further studies on more interesting subjects, such as the resilience and resistance of the supply network along birds' movement paths in urban areas under various disturbances.

Keywords : ecosystem service, birds' dispersal movement,
random walk, Markov process, network,
betweenness centrality

Student Number : 2003-31153